ISSN 2410-7360 (Print)
ISSN 2411-3913 (Online)

Міністерство освіти і науки України

ВІСНИК

ХАРКІВСЬКОГО
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
імені В. Н. КАРАЗІНА

СЕРІЯ
“ГЕОЛОГІЯ. ГЕОГРАФІЯ. ЕКОЛОГІЯ”

<><><><><><><><><><><><><><><><><>

Випуск 63

<><><><><><><><><><><><><><><><><>

Заснована 1970 року

Харків
2025

Засновник і видавець
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
Міністерства освіти і науки України

Наукове фахове видання України категорії «А» в галузях наук:
10 Природничі науки за спеціальностями: 103 Науки про Землю, 106 Географія.
Наказ МОН України № 1643 від 28.12.2019 р.

Засновано у 1970 році
Періодичність виходу – 2 рази на рік

УДК 55+91+502/504](062.552)

У *Віснику* розглянуто питання взаємодії суспільства і природи, раціонального використання та охорони природного середовища. Відображено результати досліджень у галузі геології, геохімії, гідрогеології, географії, екології та соціально-економічної географії.

Для науковців, фахівців і викладачів вищих закладів освіти.

Затверджено до друку рішенням Вченої ради Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (протокол № 30 від 24.11.2025 р.).

Редакційна колегія:

д. геол.-мін. н., проф. ***В. Г. Суярко*** (голова редколегії); ***О. В. Чуєнко*** (відповідальний секретар); д. геол. н., проф. ***О. В. Бартащук***; д. геогр. н., проф. ***О. М. Крайнюков***; д. геол.-мін. н., проф. ***А. І. Лур'є***; д. геогр. н., проф. ***Н. В. Максименко***; д. геогр. н., проф. ***А. Н. Некос***; д. геогр. н., проф. ***Л. М. Нємець***; д. геогр. н., проф. ***В. А. Пересадько***; д. геогр. н., проф. ***К. Ю. Сегіда*** (заступник голови); (Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна); д. техн. н., проф. ***В. С. Білецький*** (Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»); д. геол.-мін. н., проф., член-кор. НАНУ ***Е. Я. Жовинський*** (Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення імені М. П. Семененка НАН України); д. геол.-мін. н., проф. ***В. М. Загнітко*** (ННІ «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка); д. фіз.-мат. н., проф. ***Г. Д. Коваленко*** (Інститут фізики високих енергій і ядерної фізики ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України); д. техн. н., проф. ***І. М. Фик*** (Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»); д. геол. н. ***Ю. В. Хоха*** (Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН України).

Іноземні члени редколегії: д. габілітований ***Здислав Адамчик*** (Інститут прикладної геології, м. Глівіце, Польща); д. географії, проф. ***Олександр Володченко*** (Інститут картографії Дрезденського технічного університету, Німеччина); д. геол. н. ***Георгій Мелікадзе*** (Інститут геофізики Тбіліського державного університету імені Івана Джавахішвілі, Грузія); д. філософії (геологічна розвідка) ***Брюс Дж. Перрі***, Камлупс, Канада; д. філософії (геологічна інженерія) ***Нуреддін Сааді*** (Університет Тріполі, Лівія); д. геології, проф., декан факультету геології ***Ахмет Сасмаз*** (Фіратський університет, Туреччина); д. габіл., проф., ***Анджей Томаш Солецкі*** (Інститут геологічних наук Вроцлавського університету, Польща); д. географії, проф., завідувач кафедри географії і туризму ***Сауліус Станайтіс*** (Литовський університет освітніх наук, Литва); декан факультету гірничої справи, екології, керування процесами та геотехнології, проф. ***Мичал Челар*** (Кошицький Технічний університет, Словаччина); д. філософії (географія), ст. наук. співробітник ***Антон Шкаруба*** (Естонський університет наук про життя, Тарту, Естонія).

"Вісник" входить до наступних міжнародних баз даних: *WorldCat*, *BASE* (Bielefeld Academic Search Engine), *ResearchBible*, *SBB* (Staatsbibliothek zu Berlin), *Ulrich's Periodicals Directory, EBSCO*, *Index Copernicus*, *Google Scholar*, *DOAJ*, *Web of Science* (ESCI), *Scopus*.

Адреса редакційної колегії: Україна, 61022, Харків, майдан Свободи, 4, ХНУ імені В. Н. Каразіна, факультет геології, географії, рекреації і туризму, тел. +38(057)707-53-56;
e-mail: geoeco-series@karazin.ua; сайт: http://periodicals.karazin.ua/geoeco

Тексти статей представлені у авторській редакції. Автори несуть повну відповідальність за зміст статей, а також добір, точність наведених фактів, цитат, власних імен та інших відомостей.

Статті пройшли внутрішнє та зовнішнє рецензування.

Ідентифікатор медіа у Реєстрі суб'єктів у сфері медіа: R30-04463 (Рішення № 1538 від 09.05.2024 р. Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення. Протокол № 15).

© Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна, оформлення, 2025

Founder and Publisher
V.N. Karazin Kharkiv National University
of the Ministry of Education and Science of Ukraine

The Journal is a professional publication in the field of science:
10 Natural sciences by specialties: 103 Earth Sciences, 106 Geography.

MES Ukraine Order No 1643 of 28/12/2019
Established in 1970
Published 2 times a year

UDC 55+91+502/504](062.552)

Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series Geology. Geography. Ecology is devoted to the modern studies in the field of geology, geochemistry, hydrogeology, ecology and social and economic geography.

"Visnyk" is intended for scientists, specialists and university lecturers.

Approved for printing by the decision of the Academic Council of V. N. Karazin Kharkiv National University (protocol No. 30 dated 24/11/2025).

Editorial Board:
Suyarko, Vasyl – Chairman of the Editorial Board, DSc (Geology and Mineralogy), Professor; ***Chuienko, Oleksandr*** – Executive Secretary; ***Bartashchuk, Oleksii*** – DSc (Geology), Professor; ***Kraynyukov, Oleksiy*** – DSc (Geography), Professor; ***Lurye, Anatoliy*** – DSc (Geology and Mineralogy), Professor; ***Maksymenko, Nadiya*** – DSc (Geography), Professor; ***Nekos, Alla*** – DSc (Geography), Professor; ***Niemets, Liudmyla*** – DSc (Geography), Professor; ***Peresadko, Vilina*** – DSc (Geography), Professor; ***Sehida, Kateryna*** – Deputy Chairman, DSc (Geography), Professor (V. N. Karazin Kharkiv National University); ***Biletsky, Volodymyr*** – DSc (Technical), Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; ***Zhovinsky, Edward*** – DSc (Geology and Mineralogy), Professor, Corresponding member of the National Academy of Science of Ukraine, M. P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine; ***Zagnitko, Vasyl*** – DSc (Geology and Mineralogy), Professor, ESI "Institute of Geology" Taras Shevchenko National University of Kyiv; ***Kovalenko, Grygoriy*** – DSc (Physics and Mathematics), Professor, Director Institute of high-energy physics and nuclear physics NSC "Kharkov Institute of Physics and Technology" National Academy of Science Ukraine; ***Fyk, Illya*** – DSc (Technical), Professor, Head of the Department of Oil, Gas and Condensate Production, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; ***Khokha, Yurii*** – DSc (Geology), Institute of Geology and Geochemistry of Combustible Minerals of NAS of Ukraine.
International Council: ***Adamczyk, Zdzisław*** – Dr. habil., Silesian University of Technology, Gliwice (Poland); ***Wolodtschenko, Alexander*** – DSc (Geography), Professor, Institute of Cartography, Dresden University of Technology (Germany); ***Melikadze, George*** – DSc (Geology), Institute of Geophysics, Ivane Javakhishvili Tbilisi State University (Georgia); ***Bruce J. Perry*** – PhD, Exploration Geologist, Kamloops (Canada); ***Saadi, Nureddin*** – PhD, University of Tripoli, Department of Geological Engineering (Libya); ***Sasmaz, Ahmet*** – DSc (Geology), Professor, Head of Geology Department, Firat University (Turkey); ***Solecki, Andrzej Tomasz***, Dr. habil., Professor, Institute of Geological Science University of Wrocław, Wrocław University (Poland); ***Stanaitis, Saulius*** – DSc (Geography), Professor, Head of the Department of Geography and Tourism, Lithuanian University of Educational Science (Lithuania); ***Cehlár, Michal*** – PhD, Professor, Dean of Faculty of Mining, Ecology, Process Control and Geotechnology, Technical University of Košice (Slovakia); ***Shkaruba, Anton*** – PhD, Senior Researcher, Estonian University of Life Sciences (Estonia).

Visnyk is a specialized edition on geological and geographical sciences. Indexed in: *WorldCat*, *BASE* (Bielefeld Academic Search Engine), *ResearchBible*, *SBB* (Staatsbibliothek zu Berlin), *Ulrich's Periodicals Directory*, *EBSCO*, *Index Copernicus*, *Google Scholar*, *DOAJ*, *Web of Science* (ESCI), *Scopus*.

Address of the Editorial Board: Ukraine, Kharkiv, 61022, 4 Svobody Sq., V. N. Karazin Kharkiv National University, School of Geology, Geography, Recreation and Tourism, tel. +38(057)707-53-56;
e-mail: geoeco-series@karazin.ua; website: http://periodicals.karazin.ua/geoeco

The texts of the articles are presented in the original edition. The authors are fully responsible for the content of the articles, as well as the selection and accuracy of the given facts, quotations, proper names and other information.

Articles have undergone internal and external peer review.

Media identifier in the Register of the field of Media Entities: R30-04463 (Decision № 1538 dated May 9, 2024 of the National Council of Television and Radio Broadcasting of Ukraine, Protocol № 15).

© V. N. Karazin Kharkiv National University, design, 2025

З М І С Т

ГЕОЛОГІЯ

Берьозкіна Людмила
ГРАНУЛОМЕТРИЧНА КЛАСИФІКАЦІЯ ДОННИХ ВІДКЛАДІВ МАЛИХ РІЧОК ПІВНІЧНОГО ПРИАЗОВ'Я …….. 12

Бойко Катерина, Улицький Олег, Бойко Павло
МОДЕЛЮВАННЯ РІВНЯ ПІДЗЕМНИХ ВОД У ПРОЦЕСІ ВИВЕДЕННЯ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ ІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЇ …….. 23

Горяйнов Сергій, Кірічік Світлана, Космачова Марія, Самчук Ірина
СТРУКТУРНІ СПІВВІДНОШЕННЯ КАЙНОЗОЙСЬКИХ СКЛАДЧАСТИХ ДЕФОРМАЦІЙ ТА РУХІВ СОЛІ ЧЕРВОНООСКІЛЬСЬКОГО КУПОЛУ …….. 35

Іщенко Ігор, Якушин Леонід
ДО ПИТАННЯ ПРО МІСЦЕВІ СТРАТИГРАФІЧНІ ПІДРОЗДІЛИ КРЕЙДОВИХ ВІДКЛАДІВ УКРАЇНСЬКОГО СЕКТОРА ПІВНІЧНО-ЗАХІДНОГО ШЕЛЬФУ ЧОРНОГО МОРЯ. СТАТТЯ 2. ВЕРХНЯ КРЕЙДА ……..... 51

Матвєєв Андрій, Тетяна Шевченко, Мамчур Сергій, Курепа Ярослав
ГЕОЛОГІЧНА БУДОВА ТА БІОСТРАТИГРАФІЧНЕ РОЗЧЛЕНУВАННЯ БУРШТИНОНОСНИХ ВІДКЛАДІВ ПАЛЕОГЕНУ ДІЛЯНКИ «ДРЕВЛЯНСЬКА», ЖИТОМИРСЬКЕ ПОЛІССЯ ……...……..…. 71

Моїсеєнко Родіон
ІХНОФОСИЛІЇ З ВІДКЛАДІВ СЕРПУХОВСЬКОГО ЯРУСУ (МІССІСІПІЙ) МОСПАНІВСЬКОЇ СТРУКТУРИ (ДНІПРОВСЬКО-ДОНЕЦЬКА ЗАПАДИНА) ……... 84

Словотенко Надія, Борняк Уляна
КОМП'ЮТЕРНЕ ФІЗИКО-ХІМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ ВОДНЮ ТА МЕТАНУ У ВОДНИХ РОЗЧИНАХ ……... 95

Ткачов Антон, Сердюкова Ольга
ДИНАМІЧНІ ЗМІНИ У МАСИВІ ГІРСЬКИХ ПОРІД В ПРОЦЕСІ ГІДРОРОЗРИВУ ПЛАСТА (НА ПРИКЛАДІ ЗАХІДНО-ХРЕСТИЩЕНСЬКОЇ БРАХІАНТИКЛІНАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ) …….. 102

Яковенко Мирослава, Хоха Юрій, Павлюк Мирослав
РУХОМІ ФОРМИ МІКРОЕЛЕМЕНТІВ У ТОРФОВИХ ВІДКЛАДАХ ЛЬВІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ: ВЕРТИКАЛЬНИЙ РОЗПОДІЛ ТА ЗВ'ЯЗОК ІЗ ФІЗИКО-ХІМІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ ……. 113

ГЕОГРАФІЯ

Байтеряков Олег, Копилов Денис
ГЕОГРАФІЧНИЙ АНАЛІЗ АВТОМОБІЛЬНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ ЗАПОРІЗЬКОЇ ОБЛАСТІ ……... 128

Бухлал Мурад, Саїд Бусмаха
ЗБЕРЕЖЕННЯ МІСЬКОЇ СПАДЩИНИ ТА ПРОСУВАННЯ ТУРИЗМУ В РАМКАХ АЛЖИРСЬКОГО ЗАКОНОДАВСТВА З ВИКОРИСТАННЯМ ГІС. ТЕМАТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ: МІСЬКА СПАДЩИНА КАСБИ БЕНІ ЄЛЛ-МАН, МСІЛА …… 145

Гумматов Нізамі, Аманова Шахназ, Ахмадова Асмар, Ісгандарова Ульвія
ВИВЧЕННЯ ПРИРОДНО-ЕКОЛОГІЧНИХ УМОВ В АГРОЛАНДШАФТАХ НА ОСНОВІ ПОЛЬОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ …… 157

Гусейнова Турана
ОЦІНКА ЯКОСТІ ЖИТТЯ НАСЕЛЕННЯ В АЗЕРБАЙДЖАНІ (НА ПРИКЛАДІ ВЕЛИКОГО КАВКАЗУ) ……... 172

Довженко Поліна, Борисенко Катерина, Попов Владислав, Хатчінсон Саймон М.
ЗБИРАЛЬНИЦЬКИЙ ТУРИЗМ: НА ПРИКЛАДІ ХАРКІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ, УКРАЇНА .. 184

Ельмугазі Ахмед Фуад
ЗВ'ЯЗОК МІЖ ЗРОСТАННЯМ НАСЕЛЕННЯ ТА ЕКОНОМІЧНИМ ЗРОСТАННЯМ В ЄГИПТІ: ГЕОГРАФІЧНА ПЕРСПЕКТИВА …… 197

Затула Василь
СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ЗМІНИ РІЧНОГО ХОДУ АТМОСФЕРНИХ ОПАДІВ В УКРАЇНІ 211

Калинич Іван, Карабінюк Микола, Ничвид Марія,
Проданець Іван, Примак Олексій, Плиска Василь
ІНСТРУМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА КАРТОГРАФУВАННЯ ОЗЕРА СИНЕВИР: ІНТЕГРАЦІЯ МЕТОДІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ДЛЯ ГЕОЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ВОДНО-БОЛОТНОГО УГІДДЯ …..... 221

Костріков Сергій, Нємець Людмила
ВІДНОВЛЕННЯ ЧЕРЕЗ ВІДБУДОВУ: ПАРТИСИПАТИВНА УРБОГЕОСИСТЕМНА ПЕДАГОГІКА КАРАЗІНСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ У ПРОЄКТІ ERASMUS+ *FUTURELAND* 234

Макеєва Анастасія
ЕТНОГРАФІЧНІ КОМПЛЕКСИ ЯК КАТАЛІЗАТОРИ РЕГІОНАЛЬНОГО РОЗВИТКУ: ДОСВІД ЧЕРНІГІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ ……..... 256

Мамедов Джума, Гаджиєв Агіл, Гулієв Махаммед
ХАРАКТЕРИСТИКА ВИНИКНЕННЯ СЕЛЕВИХ ПОТОКІВ ТА ВИВЧЕННЯ СЕЛЕВИХ ВІДКЛАДІВ В АЗЕРБАЙДЖАНСЬКІЙ ЧАСТИНІ ВЕЛИКОГО КАВКАЗУ .. 266

Маргарян Вардуі, Решетченко Світлана, Дмитрієв Святослав
ЛЬОДОВИКОВИЙ РЕЖИМ РІЧКИ ДРАХТИК (БАСЕЙН ОЗЕРА СЕВАН) В УМОВАХ ЗМІНИ КЛІМАТУ …..……..... 278

Мусаєва Матанат, Гусейнов Джамал, Сулейманов Махмуд
АНАЛІЗ ЗАЛЕЖНОСТІ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕМЕНТІВ СНІГУ ВІД ОРОГРАФІЇ НА ПІВНІЧНО-СХІДНОМУ СХИЛІ ВЕЛИКОГО КАВКАЗУ …….. 289

Недострелова Лариса, Чеботарьова Наталія
АНАЛІЗ РАДІАЦІЙНОГО РЕЖИМУ АТМОСФЕРИ ДЛЯ ОЦІНКИ ПОТЕНЦІАЛЬНИХ ГЕЛІОЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ УКРАЇНИ …….. 300

Овчарук Валерія
СУЧАСНИЙ ВОДНИЙ СТІК ВЕЛИКИХ РІЧОК УКРАЇНИ, ЯКІ ВПАДАЮТЬ У ПІВНІЧНО-ЗАХІДНУ ЧАСТИНУ ЧОРНОГО МОРЯ …… 312

Остапчук Сергій, Остапчук Оксана, Більчук Павло
СТАН ВКРИТИХ ДЕРЕВНОЮ РОСЛИННІСТЮ ТЕРИТОРІЙ КРЕМІНСЬКОЇ ГРОМАДИ ЛУГАНСЬКОЇ ОБЛАСТІ ПІД ЧАС ВІЙНИ: СУПУТНИКОВИЙ АНАЛІЗ … 332

Провотар Наталія, Щука Галина, Мезенцев Костянтин
ТИМЧАСОВІСТЬ VS ІНТЕГРАЦІЯ ВИМУШЕНО ПЕРЕМІЩЕНИХ ОСІБ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ: КЕЙС ПРИКОРДОННИХ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД ЗАКАРПАТТЯ ……... 349

Сафаров Сурхай
ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ СТАТИСТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ РОЗРОБКИ СЦЕНАРІЮ МОЖЛИВИХ ЗМІН ТЕМПЕРАТУРИ ПОВІТРЯ У ВЕСНЯНИЙ СЕЗОН НАД ТЕРИТОРІЄЮ АЗЕРБАЙДЖАНУ …….. 366

Сегіда Катерина, Сантос Феррейра Карла Софія, Гусєва Наталія, Кравченко Катерина, Ключко Людмила, Кучерява Ганна, Суптело Ольга, Телебєнєва Євгенія
ІНТЕГРАЦІЯ КОНЦЕПЦІЇ СТАЛОГО РОЗВИТКУ В ГЕОГРАФІЧНУ ОСВІТУ: ВІД ГЛОБАЛЬНИХ ПЕРСПЕКТИВ ДО ДОСВІДУ УКРАЇНИ ……. 382

Сивий Мирослав, Дем'янчук Петро, Холошин Ігор, Пантелєєва Наталя
СИРОВИННА БАЗА ЩЕБЕНЮ ТА БУТОВОГО КАМІННЯ ХМЕЛЬНИЦЬКОЇ ОБЛАСТІ ……. 398

Сопова Надія, Олепір Роман, Сопов Дмитро, Кирпичова Ірина, Березенко Катерина, Чередниченко Ірина, Маслова Наталія, Бузіна Ірина, Макєєва Людмила, Бубнікович Аліна
КОМПЛЕКСНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ГЕОПРОСТОРОВИХ ЗМІН РОДЮЧОСТІ ҐРУНТІВ ЧЕРКАСЬКОЇ ОБЛАСТІ З ВИКОРИСТАННЯМ МОДЕЛЕЙ CLUE-S ТА ANN 411

Стахів Ірина, Зацерковний Віталій, Лященко Олеся, Ворох Віктор, Мінжинер Анна, Клипа Андрій
ПРОБЛЕМИ ТА ШЛЯХИ УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛІКУ ПОШКОДЖЕНИХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ УГІДЬ МЕТОДАМИ ДЗЗ …… 426

Тютюнник Юліан
ЛАНДШАФТНІ СЛІДИ І ПАЛІМПСЕСТИ В ІНДУСТРІАЛЬНІЙ КУЛЬТУРНО-ІСТОРИЧНІЙ СПАДЩИНІ …….. 439

Фесюк Василь, Федонюк Микола, Мороз Ірина, Федонюк Віталіна
МЕТОДИКА ТА ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ОЦІНКИ МАСШТАБІВ І НАСЛІДКІВ ПОЖЕЖ В МЕЖАХ ОБ'ЄКТІВ СМАРАГДОВОЇ МЕРЕЖІ ВОЛИНСЬКОГО ТА ЖИТОМИРСЬКОГО ПОЛІССЯ ЗА ДАНИМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ….. 451

Хожило Максим
ЕКОНОМІЧНІ, ЕКОЛОГІЧНІ ТА СОЦІАЛЬНІ ВИМІРИ ЗЕЛЕНОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ В УКРАЇНІ: АСПЕКТИ УПРАВЛІННЯ В УМОВАХ ВІЙНИ ТА ПОВОЄННОЇ ВІДБУДОВИ ……. 468

Яцентюк Юрій, Воловик Володимир, Міщенко Олена, Гришко Світлана, Кравцова Ірина
ВІДНОВЛЕНА ТА СУЧАСНА ЛАНДШАФТНІ СТРУКТУРИ СИНИЦЬКОГО ПАРКУ У ЧЕРКАСЬКІЙ ОБЛАСТІ ……..... 479

ЕКОЛОГІЯ

Абушова Саміра
РОЛЬ МОРФОМЕТРИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ РЕЛЬЄФУ В ОЦІНЦІ ЕКОГЕОМОРФОЛОГІЧНИХ УМОВ ФІЗУЛІНСЬКОГО АДМІНІСТРАТИВНОГО РАЙОНУ ……..... 494

Асифірадаяті Резанія, Вінді Вуландарі, Дженіта Берліан Н, Сіті Рохана Мохд Ятім
ЗАЛИШКОВА ПОВЕДІНКА ХЛОРУ ПРИ ДЕЗІНФЕКЦІЇ ВОДИ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМБІНОВАНИХ ПІЩАНИХ СЕРЕДОВИЩ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ХЛОРУ ……... 507

Безсонний Віталій
ЕНТРОПІЙНО-ЗВАЖЕНА МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПОВЕРХНЕВИХ ВОД БАСЕЙНУ РІЧКИ ПІВДЕННИЙ БУГ …….. 516

Буц Юрій, Крайнюк Олена, Сухов Валерій, Лісняк Анатолій, Катковнікова Лідія
ЕКОГЕОХІМІЧНА ОЦІНКА ЗАБРУДНЕННЯ ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ ҐРУНТОВОГО ПОКРИВУ ІЗЮМСЬКОГО РАЙОНУ ПІД ВПЛИВОМ БОЙОВИХ ДІЙ .. 530

Горошкова Лідія, Меншов Олександр, Некос Алла, Корнійчук Юлія, Горошков Станіслав, Кочанов Едуард
ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ПОВЕРХНЕВИХ ВОД РІЧКИ ПІВДЕННИЙ БУГ НА ТЕРИТОРІЇ МИКОЛАЇВСЬКОЇ ОБЛАСТІ ……. 542

Гудзевич Анатолій, Коробкова Ганна, Баюрко Наталія, Шмагельська Марина
ГІДРОМЕРЕЖА СЕЛИТЕБА У КОНТЕКСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ ЄВРОСОЮЗНИХ ПРИРОДООХОРОННИХ СТРАТЕГІЙ ……..... 556

Клименко Микола, Романчук Людмила, Бєдункова Ольга, Вознюк Наталія, Ліхо Олена
АНАЛІЗ ФОРМУВАННЯ ПРОФІЛІВ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ СКИДУ В КОНТЕКСТІ ДОТРИМАННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ ЯКОСТІ РІЧКИ-РЕЦИПІЄНТА ……. 566

Мажидлі Каміла, Мамедов Ахмад, Алієв Фаган
ДЕГРАДАЦІЯ ВОДНОЇ ЕКОСИСТЕМИ ВНАСЛІДОК ПРОМИСЛОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ: ДОСЛІДЖЕННЯ РІЧКИ ОКЧУ …….. 580

Сеїдова Ельнара, Салманлі Нармін, Кара Гюльтен, Ганбарова Нурлана
ОЦІНКА РИЗИКУ НЕБЕЗПЕКИ МЕЦАМОРСЬКОЇ АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ (АЕС) У НАХЧИВАНСЬКІЙ АВТОНОМНІЙ РЕСПУБЛІЦІ ……. 589

Сонько Сергій, Максименко Надія
НООСФЕРНЕ БАЧЕННЯ КОНЦЕПЦІЇ СТАЛОГО РОЗВИТКУ …….. 604

Тучковенко Юрій, Кушнір Дмитро
ОЦІНКА МАСШТАБІВ ЗАБРУДНЕННЯ МОРЯ ВНАСЛІДОК РУЙНУВАННЯ ДАМБИ КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА НА ОСНОВІ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ … 619

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ, ЩО ПОДАЮТЬСЯ ДО «ВІСНИКА ХАРКІВСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ» ……..... 633

C O N T E N T

GEOLOGY

Berozkina Liudmyla
GRANULOMERTIC CLASSIFICATION OF BOTTOM SEDIMENTS
OF SMALL RIVERS OF THE NORTHERN AZOV SEA REGION …….. 12

Boiko Kateryna, Ulitskiy Oleg, Boiko Pavlo
GROUNDWATER LEVEL MODELING
DURING THE COAL MINES´ DECOMMISSIONING ……. 23

Goryainov Sergey, Kirichik Svitlana, Kosmachova Maria, Samchuk Iryna
STRUCTURAL RELATIONSHIPS OF CENOZOIC FOLDING DEFORMATIONS
AND SALT MOVEMENTS OF THE CHERVONOOSKIL DOME …….. 35

Ishchenko Ihor, Yakushyn Leonid
TO THE QUESTION OF LOCAL STRATIGRAPHIC SUBDIVISIONS OF CRETACEOUS
SEDIMENTS OF THE UKRAINIAN SECTOR OF THE NORTHWESTERN SHELF
OF THE BLACK SEA. ARTICLE 2. UPPER CRETACEOUS ……..... 51

Matveev Andriy, Shevchenko Tetiana, Mamchur Serhii, Kurepa Yaroslav
THE GEOLOGICAL STRUCTURE AND BIOSTRATIGRAPHIC DIVISION
OF AMBER-BEARING PALEOGENE DEPOSITS
OF THE «DREVLIANSKA» SITE, ZHYTOMYR POLISSIA ……...…… 71

Moiseienko Rodion
TRACE FOSSILS FROM SERPUKHOVIAN (MISSISSIPIAN) SEDIMENTS
OF MOSPANIVSKA GEOLOGICAL STRUCTURE (DNIPER-DONETSK DEPRESSION) . 84

Slovotenko Nadiya, Bornyak Ulyana
COMPUTER PHYSICOCHEMICAL MODELING OF HYDROGEN
AND METHANE BEHAVIOR IN AQUEOUS SOLUTIONS ……..... 95

Tkachov Anton, Serdiukova Olga
TECTONOPHYSICAL CHANGES IN ROCK MASS DURING HYDRAULIC
FRACTURING (BASED ON THE EXAMPLE
OF THE WEST-KHRESTISHCHE BRACHYANTICLINE STRUCTURE) ……. 102

Yakovenko Myroslava, Khokha Yurii, Pavlyuk Myroslav
VERTICAL DISTRIBUTION OF MOBILE TRACE ELEMENTS IN PEAT DEPOSITS
OF THE LVIV REGION AND THEIR RELATIONSHIPS
WITH PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES …… 113

GEOGRAPHY

Baiteriakov Oleg, Kopylov Denys
GEOGRAPHICAL ANALYSIS OF THE AUTOMOBILE TRANSPORT NETWORK
OF ZAPORIZHZHIA REGION ……..... 128

Bouhlal Mourad, Said Bousmaha
PRESERVATION OF URBAN HERITAGE AND PROMOTION OF TOURISM WITHIN THE FRAMEWORK OF ALGERIAN LAW USING GIS. CASE STUDY: URBAN HERITAGE OF THE BENI YELLMAN CASBAH, M'SILA …….. 145

Hummatov Nizami, Amanova Shahnaz, Ahmadova Asmar, Isgandarova Ulviyya
STUDY OF NATURAL-ECOLOGICAL CONDITIONS IN AGRO-LANDSCAPES BASED ON FIELD SURVEYS AND REMOTE SENSING …….. 157

Huseynova Turana
ASSESSMENT OF THE QUALITY OF LIFE OF THE POPULATION IN AZERBAIJAN (ON THE EXAMPLE OF THE GREATER CAUCASUS) ……. 172

Dovzhenko Polina, Borysenko Kateryna, Popov Vladyslav, Hutchinson Simon M.
THE TOURISM OF COLLECTING: A CASE STUDY FROM THE KHARKIV REGION, UKRAINE 184

Elmoughazi Ahmed Fouad
THE RELATIONSHIP BETWEEN POPULATION GROWTH AND ECONOMIC GROWTH IN EGYPT: A GEOGRAPHICAL PERSPECTIVE …….. 197

Zatula Vasyl
PRESENT TENDENCIES OF ANNUAL CYCLE RAINFALL CHANGE IN UKRAINE ……. 211

Kalynych Ivan, Karabiniuk Mykola, Nychvyd Mariia, Prodanets Ivan, Prymak Oleksii, Plyska Vasyl
INSTRUMENTAL STUDY AND MAPPING OF LAKE SYNEVYR: REMOTE SENSING INTEGRATION FOR WETLAND GEOECOLOGICAL MONITORING …..... 221

Kostrikov Sergiy, Niemets Liudmyla
RESTORATION AS RECOVERY: PARTICIPATORY URBOGEOSYSTEMIC PEDAGOGY OF KARAZIN UNIVERSITY FOR THE ERASMUS+ PROJECT *FUTURELAND* 234

Makeieva Anastasiia
ETHNOGRAPHIC COMPLEXES AS CATALYSTS FOR REGIONAL DEVELOPMENT: INSIGHTS FROM CHERNIHIV REGION ……... 256

Mamedov Juma, Hajiyev Agil, Guliyev Mahammad
CHARACTERISTICS OF MUDFLOW OCCURRENCE AND THE STUDY OF MUDFLOW DEPOSITS IN THE AZERBAIJANI PART OF THE GREATER CAUCASUS MOUNTAIN …… 266

Margaryan Varduhi, Reshetchenko Svitlana, Dmitriiev Sviatoslav
GLACIER REGIME OF THE DRAKHTIK RIVER (LAKE SEVAN BASIN) IN THE CONDITIONS OF CLIMATE CHANGE …..……..... 278

Musayeva Matanat, Huseynov Jamal, Suleymanov Mahmud
THE ANALYSIS OF THE DEPENDENCE OF CHARACTERISTIC ELEMENTS OF SNOW ON OROGRAPHY ON THE NORTHEASTERN SLOPE OF THE GREATER CAUCASUS ……..... 289

Nedostrelova Larysa, Chebotarova Nataliia
ANALYSIS OF THE RADIATION REGIME OF THE ATMOSPHERE FOR THE ASSESSMENT OF POTENTIAL SOLAR ENERGY RESOURCES OF UKRAINE 300

Ovcharuk Valeriya
MODERN RUNOFF OF THE MAJOR RIVERS OF UKRAINE INTO THE NORTHWESTERN PART OF THE BLACK SEA …….. 312

Ostapchuk Serhii, Ostapchuk Oksana, Bilchuk Pavlo
THE STATE OF TREE-COVERED TERRITORIES OF KREMINNA COMMUNITY IN LUHANSK REGION DURING THE WAR: SATELLITE ANALYSIS ……... 332

Provotar Nataliia, Shchuka Halyna, Mezentsev Kostyantyn
TEMPORARINESS VS. INTEGRATION OF INTERNALLY DISPLACED PERSONS UNDER UNCERTAINTY: THE CASE OF BORDER TERRITORIAL COMMUNITIES IN ZAKARPATTIA …….. 349

Safarov Surkhay
ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF A STATISTICAL MODEL FOR DEVELOPING A SCENARIO OF POSSIBLE AIR TEMPERATURE CHANGES IN THE SPRING SEASON OVER THE TERRITORY OF AZERBAIJAN …….. 366

Sehida Kateryna, Santos Ferreira Carla Sofia, Husieva Nataliia, Kravchenko Kateryna, Kliuchko Liudmyla, Kucheriava Hanna, Suptelo Olha, Telebienieva Ievgeniia
INTEGRATING SUSTAINABLE DEVELOPMENT INTO GEOGRAPHICAL EDUCATION: FROM GLOBAL PERSPECTIVES TO THE CASE OF UKRAINE …… 382

Syvyi Myroslav, Demyanchuk Petro, Kholoshyn Igor, Panteleeva Natalia
RAW MATERIAL BASE OF CRUSHED STONE AND RUBBLE STONE IN KHMELNYTSKYI OBLAST ……. 398

Sopova Nadiia, Olepir Roman, Sopov Dmytro, Kyrpychova Iryna, Berezenko Kateryna, Cherednychenko Iryna, Maslova Nataliia, Buzina Iryna, Makieieva Liudmyla, Bubnikovych Alina
COMPREHENSIVE FORECASTING OF GEOSPATIAL CHANGES IN SOIL FERTILITY IN CHERKASY REGION USING CLUE-S AND ANN MODELS ……... 411

Stakhiv Iryna, Zatserkovnyi Vitalii, Liashchenko Olesia, Vorokh Viktor, Minzhyner Anna, Klypa Andrii
CHALLENGES AND ADVANCES IN THE ASSESSMENT OF DAMAGED AGRICULTURAL LAND USING REMOTE SENSING …… 426

Tyutyunnyk Yulian
LANDSCAPE TRACES AND PALIMPSESTS IN INDUSTRIAL CULTURAL AND HISTORICAL HERITAGE ……. 439

Fesyuk Vasyl, Fedonyuk Mykola, Moroz Iryna, Fedonyuk Vitalina
METHODOLOGY AND PRACTICAL IMPLEMENTATION OF ASSESSING THE SCALE AND CONSEQUENCES OF FIRES WITHIN THE EMERALD NETWORK OF VOLYN AND ZHYTOMYR POLISSYA USING REMOTE SENSING …..... 451

Khozhylo Maksym
ECONOMIC, ENVIRONMENTAL AND SOCIAL DIMENSIONS OF GREEN TRANSFORMATION IN UKRAINE: ASPECTS OF MANAGEMENT IN CONDITIONS OF WAR AND POST-WAR RECONSTRUCTION …… 468

Yatsentiuk Yurii, Volovyk Volodymyr, Mishchenko Olena, Hryshko Svitlana, Kravtsova Iryna
RESTORED AND MODERN LANDSCAPE STRUCTURES OF THE SYNYTSKY PARK IN CHERKASY REGION ……... 479

ECOLOGY

Abushova Samira
THE ROLE OF MORPHOMETRIC INDICATORS OF RELIEF IN THE ASSESSMENT OF ECOGEOMORPHOLOGICAL CONDITIONS IN THE FUZULI ADMINISTRATIVE REGION ……..... 494

Asyfiradayati Rezania, Windi Wulandari, Jenita Berlian N., Mohd Yatim Siti Rohana
CHLORINE RESIDUAL BEHAVIOR IN WATER DISINFECTION USING COMBINED SAND MEDIA WITH CHLORINE APPLICATION ……... 507

Bezsonnyi Vitalii
ENTROPY-WEIGHTED MODEL FOR ASSESSING THE ENVIRONMENTAL SAFETY OF SURFACE WATERS IN THE SOUTHERN BUG RIVER BASIN ……. 516

Buts Yuriy, Krainiuk Olena, Sukhov Valeriy, Lisnyak Anatoliy, Katkovnikova Lidiya
ECOGEOCHEMICAL ASSESSMENT OF HEAVY METAL CONTAMINATION OF THE SOIL COVER OF THE IZYUM DISTRICT UNDER THE INFLUENCE OF HOSTILITIES .. 530

Horoshkova Lidiia, Menshov Oleksandr, Nekos Alla, Korniichuk Yuliia, Horoshkov Stanislav, Kochanov Eduard
ECOLOGICAL ASSESSMENT AND FORECASTING OF SURFACE WATER CONDITIONS IN THE SOUTHERN BUG RIVER IN THE TERRITORY OF MYKOLAIV REGION ……..... 542

Hudzevych Anatoliy, Korobkova Hanna, Shmahelska Maryna, Baiurko Nataliia
SELITEB HYDRAULIC NETWORK IN THE CONTEXT OF THE IMPLEMENTATION OF EU ENVIRONMENTAL PROTECTION STRATEGIES ……..... 556

Klymenko Mykola, Romanchuk Liudmyla, Biedunkova Olha, Vozniuk Nataliia, Olena Likho
AN ANALYSIS OF THE FORMATION OF PROFILES OF PHYSICAL AND CHEMICAL INDICATORS DISCHARGE IN THE CONTEXT OF COMPLIANCE WITH THE ENVIRONMENTAL QUALITY OF THE RECIPIENT RIVER …… 566

Majidli Kamila, Mammadov Ahmad, Aliyev Fagan
AQUATIC ECOSYSTEM DEGRADATION DUE TO INDUSTRIAL POLLUTION: A CASE STUDY OF THE OKCHU RIVER ……... 580

Seyidova Elnara, Salmanli Narmin, Kara Gülten, Ganbarova Nurlana
ASSESSMENT OF THE HAZARD RISK OF THE METSAMOR NUCLEAR POWER PLANT (NPP) IN NAKHCHIVAN AUTONOMOUS REPUBLIC …… 589

Sonko Segiy, Maksymenko Nadiya
NOOSPHERIC VISION OF THE CONCEPT OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT …… 604

Tuchkovenko Yurii, Kushnir Dmytro
ESTIMATION OF THE EXTENT OF MARINE POLLUTION AS A CONSEQUENCE OF THE KAKHOVKA RESERVOIR DAM DESTRUCTION BASED ON SIMULATION RESULTS ……. 619

SUBMISSION TO THE «VISNYK OF V.N. KARAZIN KHARKIV NATIONAL UNIVERSITY». AUTHOR GUIDELINES ……..... 633

ГЕОЛОГІЯ

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-01
УДК 551.46-024:(28)(477)

Надійшла 16 липня 2025 р.
Прийнята 27 жовтня 2025 р.

Гранулометрична класифікація донних відкладів малих річок північного Приазов'я

Людмила Берьозкіна
мол. наук. співробітник, ДНУ «Центр проблем морської геології, геоекології та осадового рудоутворення НАН України», Кривий Ріг, Україна,
e-mail: lkurazyeyeva@gmail.com, http://orchid.org/0000-0002-7444-6860

В статті проаналізовано напрацювання вчених Європи та США в сфері дослідження морських донних відкладів, їх класифікації та картографування морського дна за гранулометричною приналежністю. Розмір зерен є ключовою характеристикою в дослідженнях донних відкладів. Існує велика кількість підходів до класифікації гранулометричного складу, однак більшість з них створено для осадових порід або ґрунтів, а не відкладів, тому постає питання вибору відповідної методики для опису саме донних осадів. Визначення меж гранулометричних фракцій загально прийняті та є спільними як для уламкових осадових порід, так і для відкладів, наведені в шкалі Вентворта. На основі цих фракцій відбувається укрупнення в так звані агрегати осаду: глина, мул, пісок, гравій. А вже шляхом співвідношення цих агрегатів визначають гранулометричні класи. Найпоширенішою серед дослідників донних відкладів є класифікація Роберта Фолка та її модифікації. Протягом останніх десятиліть відбулось значне укрупнення прибережних донних відкладів Азовського моря, в тому числі і в пригирлових ділянках річок. На сьогодні мулисті фракції переважно відсутні, або мають незначну відсоткову частку. Проте кількість частинок розміром більше 2 мм значно зросла. Таким чином попередньо описані підходи до класифікації азовських донних відкладів втратили свою актуальність. Тому для характеристики донних відкладів північного Приазов'я було використано спрощену класифікацію Фолка, яка складається з одинадцяти класів та представлена через тричленну залежність. Наведено порівняння традиційного для українських літологічних досліджень поділу на псефіти, псаміти, алеврити, пеліти з поділом на гранулометричні агрегати осаду за схемою Фолка. Засобами мови програмування Python створено шаблон тернарної діаграми розподілу на гранулометричні класи осаду. Обгрунтовано зроблено висновки про те, що сучасні літологічні дослідження в Україні потребують структурованих рекомендацій щодо інтерпретації та подання результатів, затвердження перекладів до термінів, запозичених з англомовної літератури з метою інтеграції до європейської наукової спільноти.

***Ключові слова**: гранулометричний аналіз, донні відклади, тричленна гранулометрична класифікація, гранулометричні класи, гранулометричні агрегати, класифікація Фолка, малі річки, Азовське море.*

Як цитувати: Берьозкіна Людмила (2025). Гранулометрична класифікація донних відкладів малих річок північного Приазов'я. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*, (63), 12-22. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-01

In cites: Berozkina Liudmyla (2025). Granulomertic classification of bottom sediments of small rivers of the northern Azov Sea region. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 12-22. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-01 [in Ukrainian]

Вступ. Питання класифікації донних відкладів за гранулометричним складом на сьогодні недостатньо висвітлене у вітчизняній літературі. Всі існуючі підходи запозичені з класифікації власне осадових порід або ж з класифікації ґрунтів.

Гранулометричний склад – одна з базових класифікаційних ознак дисперсних порід. Однак є суттєві відмінності у визначенні меж фракцій, а відтак, і складнощі кореляції традиційних для України та закордонних класифікаційних схем. Всі класифікації зарубіжних авторів західного світу опираються на шкалу Вентворта або ж так звана таблиця розміру зерен [1]. Сучасні дослідження та методичні рекомендації базуються на характеристиці донних відкладів через тричленну залежність [2-4].

Академік Шнюков Е.Ф. у своїх працях [5] пропонував використовувати тричленну гранулометричну класифікацію для характеристики донних відкладів Азовського моря, відповідно до якої бралось співвідношення відсоткового вмісту псамітів, пелітів та алевритів. Однак, на сьогодні виникають труднощі щодо застосування цього підходу до типізації сучасних донних відкладів, оскільки отримані дані гранулометричного аналізу демонструють наявність вагомої частки псефітової фракції (в більшості проб близько половини відсоткового складу), яка не враховується в згаданій класифікації, оскільки донний матеріал, який опрацьовувався під час досліджень Шнюкова та інших був дрібнорозмірним, тобто в ньому була відсутня псефітова фракція. На основі цього будуються наступні твердження:

- Протягом останніх 60 років грануломет-

© Берьозкіна Людмила, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

ричний склад донних відкладів Азовського моря суттєво змінився в бік укрупнення від різкого переважання пелітової і алевритової фракції до домінування псамітової та псефітової фракції.

- Постає питання у підборі відповідного підходу до класифікації донного осаду на основі наявного гранулометричного складу.

Номенклатура, що описує розподіл текстури осаду, важлива для геологів та седиментологів, оскільки розмір зерен є найважливішою характеристикою осаду. Традиційно геологи поділяли осади на чотири фракції розмірів, що включають гравій, пісок, мул та глину, та класифікували ці осади на основі співвідношень різних пропорцій фракцій. Визначення фракцій давно стандартизовані за шкалою градацій, описаною Вентвортом. Зокрема, згідно зі шкалою градацій Вентворта, частинки розміру гравію мають номінальний діаметр 2 мм; частинки розміру піску мають номінальний діаметр від <2 мм до >62,5 мкм; частинки розміру мулу мають номінальний діаметр від <62,5 мкм до >4 мкм; а глина - <4 мкм [1, 4].

Хоча для опису приблизного співвідношення між фракціями розмірів було прийнято кілька схем класифікації, більшість седиментологів використовують одну з систем, описаних або Шепардом [6-8], або Фолком [9-11]. Оригінальна схема, розроблена Шепардом, використовувала одну потрійну діаграму з піском, мулом та глиною в кутах для графічного відображення відносних пропорцій між цими трьома агрегатами у вибірці. Однак ця схема не враховує осади зі значною кількістю гравію. Тому схема класифікації Шепарда була згодом змінена шляхом додавання другої потрійної діаграми для врахування гравійної фракції [12].

Система, розроблена Фолком, також базується на двох трикутних діаграмах, але вона має 21 основну категорію та використовує термін «mud» (визначений як мул плюс глина). Структури в трикутниках обох систем відрізняються, як і акцент, що робиться на гравії. Наприклад, у системі, описаній Шепардом, гравійні осади містять понад 10 відсотків гравію; у системі Фолка злегка гравійні осади містять лише 0,01 відсотка гравію. Схема класифікації Фолка наголошує на гравії, оскільки його концентрація характеризує найвищі швидкості течії в момент осадження, а також максимального розміру зерен доступного детриту; схема класифікації Шепарда наголошує на співвідношенні піску, мулу та глини, оскільки вони відображають сортування та перевідкладення [9].

Геологічна служба Сполучених Штатів (USGS) наводить такі пояснення термінів, які використовуються в гранулометричному аналізі:

Ступінь осаду (sediment grade; український аналог терміну – фракція) – це група осадових зерен (ідентифікованих за допомогою аналізу розміру зерен), що є частиною класифікаційної послідовності з 23 ступенів, кожен з яких має діапазон розміру зерен у міліметрах, що подвоюється зі збільшенням діаметра зерен (схема, розроблена Удденом, 1914). Ступені, засновані на цій схемі, були названі Удденом (1914), Вентвортом (1922), а також Блером і Макферсоном (1999). Ступені, виражені в міліметрах, були перетворені на шкалу Фі Крум-Бейном (1936). Ступені базуються лише на розмірі зерен. Вони не обов'язково мають інтерпретаційне значення. Малоймовірно, що природний осад, описаний як клас осадових порід, представлений лише одним ступенем.

Комплексний ступінь осаду (composite sediment grade) – термін, запропонований для опису групи осадових зерен, утворених шляхом об'єднання від двох до семи ступенів осаду у комплексні ступені осаду, щоб спростити класифікацію ступенів Уддена, Вентворта та Блера та Макферсона, а також додати інтерпретаційне значення до класифікації (наприклад, грубозернистий пісок рухається як донний нанос, а дрібнозернистий пісок рухається у завісі).

Агрегат осаду (sediment aggregate): Вентворт згрупував осадові породи в один із чотирьох агрегатів: глина (clay), мул (silt), пісок (sand) та гравій (gravel). Фолк об'єднав глину та мул у агрегат грязь (mud). Агрегати можуть зустрічатися як природні класи осаду. Агрегати мають інтерпретаційне значення (наприклад, зерна мулу та гравію рухаються по-різному та відіграють різні екологічні ролі на морському дні).

Клас осаду (sediment class) – природна суміш зерен осадових порід. Клас осаду (на основі аналізу розміру зерен) визначається не певним діапазоном розмірів зерен (як у визначенні ступеню чи агрегату), а ваговими відсотками агрегатів та композитних класів, які він містить. Класи осаду мають інтерпретаційне значення. Вентворт класифікував природні осади на 10 класів осаду. Він визначив класи за ваговим відсотком кожного з чотирьох агрегатів (глина, мул, пісок, гравій) в осаді. Фолк класифікував природні осади на п'ятнадцять текстурних класів на основі вагових відсотків трьох агрегатів (грязь, пісок, гравій) в осаді. Класи Фолка можна змінювати та збільшувати їх кількість, додаючи терміни, що описують середній розмір зерен як гравійних, так і піщаних заповнювачів, виражений у вигляді класів (наприклад, галькoвий крупнозернистий пісок), співвідношення мулу до глини та ступінь сортування [4].

Кожен осад являє собою суміш зерен різного

розміру. Існують різні визначення термінів, що використовуються для позначення різних розмірів окремих зерен, і аналогічно різні визначення термінів, що використовуються для опису відносних пропорцій зерен різних розмірів. Проте саме класифікація за Фолком лягає в основу досліджень відкладів морського дна. Вона поділяє зерна на грязь, пісок і гравій на основі їх діаметра з межею між зернами грязі та піску 63 мкм (0,063 мм) та межею між зернами піску та гравію 2 мм. Відносна частка зерен у трьох категоріях потім використовується для опису осаду і відображається на діаграмі, яку зазвичай називають «трикутником Фолка» [12].

Класифікацію осадових порід Фолка кілька разів спрощували з метою картографування європейських морських відкладів у регіональних масштабах 1:250 000 та 1:1 000 000. Британська геологічна служба (BGS) об'єднала 15 класів Фолка в 11 або 4 класи. Під час цього процесу нижню межу для розпізнавання гравію було підвищено з 0,01 вагового відсотка Фолка до 1, а потім до 5 вагових відсотків, а межу між піщаним мулом та мулистим піском було перевизначено. Цей підхід зменшував вміст гравію в осаді та наголошував на вмісті мулу. Розділення між осадом з вмістом гравію менше 1% та тим, що містить 1–5% гравію, було вилучено для серії карт BGS 1:1 000 000. Окрім об'єднання класів, важливо зазначити, що критерії розміру частинок, що використовуються для визначення цих класів, відрізняються від критеріїв звичайного трикутника Фолка. Основна відмінність полягає у розмежуванні мулистих пісків від піщаних мулів, де співвідношення піску до грязі становить 1:4; тобто осад може містити до 79,9% піску, а при 20,1% грязі на морському дні він все ще матиме характеристики середовища існування «грязь та піщана грязь» [4, 13].

Європейська мережа морського спостереження та даних (EMODnet) використовує модифіковану класифікацію Фолка, подібну до класифікації BGS, описаної Лонгом, для картографування осадів морського дна в масштабах 1:250 000 та 1:1 000 000. Для своїх досліджень науковці проекту EMODnet спростили 15 класів осадових порід Фолка до 6 або 4 класів та додали клас «скелі та валуни». Карти європейських морів EMODnet показують розподіл донних відкладів, використовуючи такі п'ять класів: від грязі до мулистого піску, пісок, змішаний осад, грубий осад і каміння та валуни. На сьогодні такий підхід стандартизований для європейських досліджень донних відкладів [14-18].

Класифікація осадових порід Фолка ідентична класифікації «неконсолідованого мінерального субстрату» Стандарту класифікації прибережної та морської екологічної зони (CMECS; Федеральний комітет географічних даних, 2012). CMECS зберігає всі порогові значення вмісту грязі, піску та гравію, запропоновані Фолком для класифікації осаду. Основна відмінність між цими двома класифікаціями полягає у зміні термінології, що виникла внаслідок перейменування 15 класів осаду Фолка на групи та підгрупи субстратів CMECS [4].

Таким чином, саме модифікації класифікації Фолка є найбільш поширеними в дослідженнях західних вчених з геології, літології, картографії морського дна, екології та дотичних наук.

Методи. Гранулометричний аналіз проводився ситовим методом у сухий спосіб. В ході аналізу вихідні проби розділено на дванадцять фракцій таких розмірностей: +10, -10+5, -5+3, -3+2, -2+1, +0,45, +0,315, +0,25, +0,1, +0,063, +0,04, -0,04. Отримані результати було згруповано в класи відповідно до двох класифікацій. За В. Т. Фроловим: об’єднано в псефіти, псаміти, алеврити та пеліти. За Робертом Фолком: поєднано в гравій (gravel), пісок (sand), грязь (mud).

Для графічного відображення результатів, використовувалась бібліотека мови програмування Python Matplotlib [19] з розширенням MplTern [20].

Опрацьовано тридцять дев’ять проб донних відкладів, відібраних у 2017, 2018 та 2021 роках з підводного конусу виносу тимчасового водотоку балки Петрівська, узбережної ділянки між містами Бердянськ та Приморськ, з річок Обитічна, Солона, Мокра Білосарайка, Комишуватка (рис. 1). Перед проведенням аналізу проби було висушено та відібрано наважку 150 грам методом квартування.

Результати та обговорення. За результатами аналізу використаних джерел для подання результатів гранулометричного аналізу було обрано спрощену модель Фолка (рис.2 а). Однак даний трикутник – це не масштабоване зображення і використовувати його як основу для тернарної діаграми неможливо. З метою спрощення процесу класифікації наявного матеріалу засобами бібліотеки MplTern [20] для мови програмування Python було створено масштабований шаблон, який коректно відображає співзалежність компонентів (рис. 2 б).

Потрібно перекласти терміни, які використовуються Фолком для опису його класифікації. Gravel і Sand мають сталі відповідники в українській мові та літології – це гравій та пісок. Однак термін Mud має прямий переклад – бруд. В інтерпретації Фолка це суміш глини (clay) та мулу (silt), відповідника такому терміну в українській науковій літературі автором не знайдено. А похідне слово «muddy», яке використовується в на-

звах класів на трикутнику перекладається, як «каламутний». Тому виникає декілька варіантів перекладу слова “mud” – це бруд, каламуть, грязь. Проте словник геологічних термінів [21] використовує “mud” для перекладу терміну «грязь» (у значені лікувальні грязі та бурова чи природна грязь). А відповідно до тлумачного словника Кембріджського університету [22] та



Рис. 1. Місця відбору проб донних відкладів / Fig. 1. Sampling places of bottom sediments



а б

Рис. 2. Спрощений трикутник Фолка: а – немасштабований рисунок [13];
б – масштабована тернарна діаграма /
Fig. 2. Simplified Folk’s triangle: a – unscaled picture; b – scalable ternary plot

тлумачного словника української мови [23] слова «mud» та «грязь» відповідно мають ідентичні тлумачення. Тому подаємо назви класів по Фолку англійською та українською у вигляді таблиці (табл. 1).

Досліджуваний матеріал згруповано відповідно до районів відбору проб. Результати ситового аналізу згруповано за двома методиками з метою порівняння. Перший спосіб групування на основі класифікації теригенно-уламкових порід

Таблиця 1

Назви класів на трикутнику Фолка

Скорочення	Англійська мова (11 класів)	Українська мова (11 класів)	Англ. мова (4 класи)	Укр. мова (4 клас)
G	Gravel	гравій	coarse sedment	грубі осадки
sG	sandy Gravel	піщаний гравій		
gS	gravelly Sand	гравійний пісок		
S	Sand	пісок	sand	пісок
mG	muddy Gravel	каламутний гравій	mixed sedi-ment	змішані осадки
gM	gravelly Mud	гравійна грязь		
msG	muddy sandy Gravel	каламутно-піщаний гравій		
gmS	gravelly muddy Sand	гравійно-каламутний пісок		
M	Mud	грязь	mud to muddy sand	грязь з каламутним піском
mS	muddy Sand	каламутний пісок		
sM	sandy Mud	піщана грязь		

(за Фроловим В.Т.) на чотири групи: псефіти, псаміти, алеврити і пеліти [24, 25]. Другий спосіб групування за схемою класифікації Фолка на три агрегати: гравій (gravel), пісок (sand), грязь (mud).

Як бачимо, суть розподілу за розмірністю зберігається в обох підходах (табл. 2). Групи псефітів і пелітів за Фроловим співвідносяться з агрегатами гравій і грязь за Фолком. Агрегат пісок за Фолком дорівнює сумі псамітів та алевритів. Однак для подальшої характеристики результатів буде використовуватись поділ за схемою Фолка тому що:

1. Класифікація Фролова розроблена для осадових порід і використовувалась для характеристики донних відкладів через відсутність подібної класифікації саме для них.
2. Схема поділу за Фолком використовується седиментологами саме для характеристики донних відкладів, а не осадових порід
3. Підхід Фолка дозволяє не лише продемонструвати відсотковий вміст певної групи, але і на основі його співвідношення віднести донний осад до певного класу
4. Інтерпретація результатів гранулометричного аналізу донних відкладів за схемою Фолка надає можливості порівняння результатів подібних досліджень, проведених зарубіжними вченими.

В пробах з річки Обитічна переважає піщана фракція. Виключенням є Проба 1, де гравію та піску майже порівну. Частка грязі не перевищує 1,7%.

В пробах річки Солона різко домінує пісок, відсоток гравію коливається від 4 до 30 %, а частка грязі найбільша 10,5% в Пробі 3, а найменша 1,6% в Пробі 1.

Чотири проби узбережної ділянки мають в своєму складі більше 90% піску. Лише в одній пробі пісок має менше 50%. В середньому вміст піску становить 75%. Частка гравію не перевищує 30% з середнім значенням 10%, і найменшим 0,1 % в Пробі 15. Грязь або майже відсутня (менше 1%), або ж досягає 24-42%.

В пробах з підводного конусу виносу також переважає пісок 62-96%, вміст гравію в середньому 21%, а вміст мулистих компонентів не перевищує 5%. Вирізняється Проба 8 найнижчими показниками гравію та грязі в 2,6% та 0,8% відповідно.

Проби річки Комишуватка характеризуються цілковитою відсутністю мулистих компонентів. Переважає пісок з вмістом гравію не більше 30%.

В пробах річки Мокра Білосарайка компоненти гравію та піску майже рівні. В Пробі 1 переважає гравій. Вміст грязі 1,2-1,8 %.

За розташуванням на трикутнику Фолка (рис. 3) проби розподілились наступним чином:

- Всі проби Мокрої Білосарайки – це піщаний гравій. Це найбільш грубозернистий матеріал серед районів дослідження
- Всі проби Комишуватки – це гравійний пісок
- Три проби Обитічної гравійний пісок та дві піщаний гравій
- Три проби Солоної гравійний пісок, одна пісок та одна гравійно-каламутний пісок
- Більшість проб з підводного конусу це гравійний пісок, дві – піщаний гравій та одна – пісок

Проби відібрані з узбережжя найбільш розпорошені по трикутнику, та містяться в чотирьох секторах. По п’ять проб в секторі гравійного піску, гравійно каламутного піску, три проби пісок та дві каламутний пісок

Якщо класифікувати за узагальненою схемою, то переважна більшість досліджуваного матеріалу це грубі відклади, з невеликою кількістю змішаних, піщаних відкладів та епізодичними пробами грязі з каламутним піском (рис. 4).

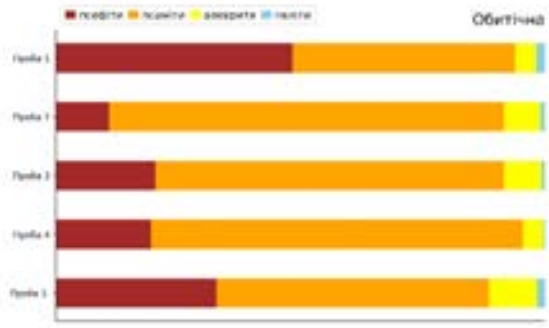
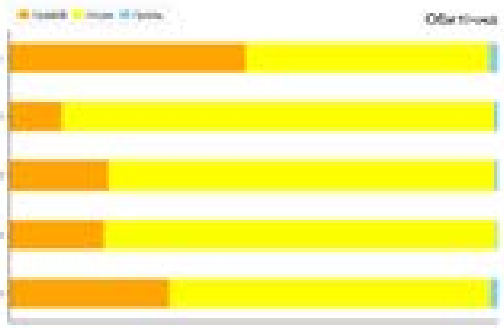
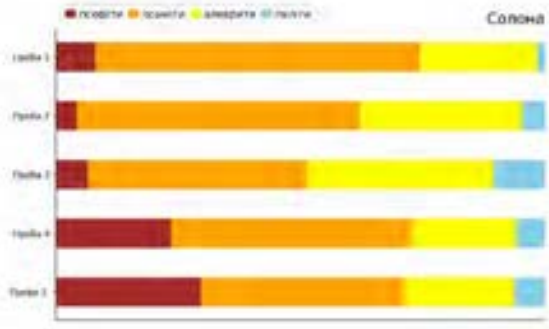
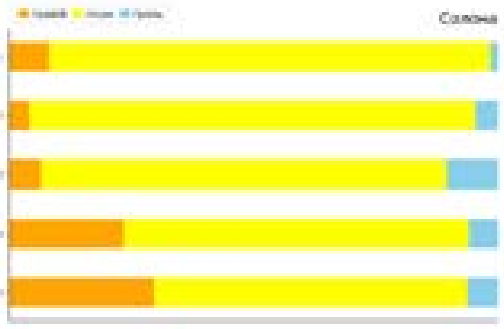
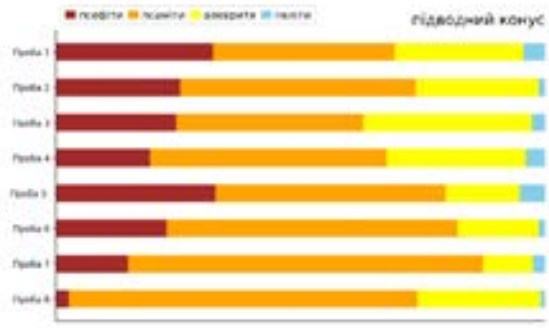
Висновки. Розмір зерен є ключовим для уламкової седиментології. Він характеризує швидкість седиментаційного потоку, допомагає

пояснити умови седиментаційних процесів.

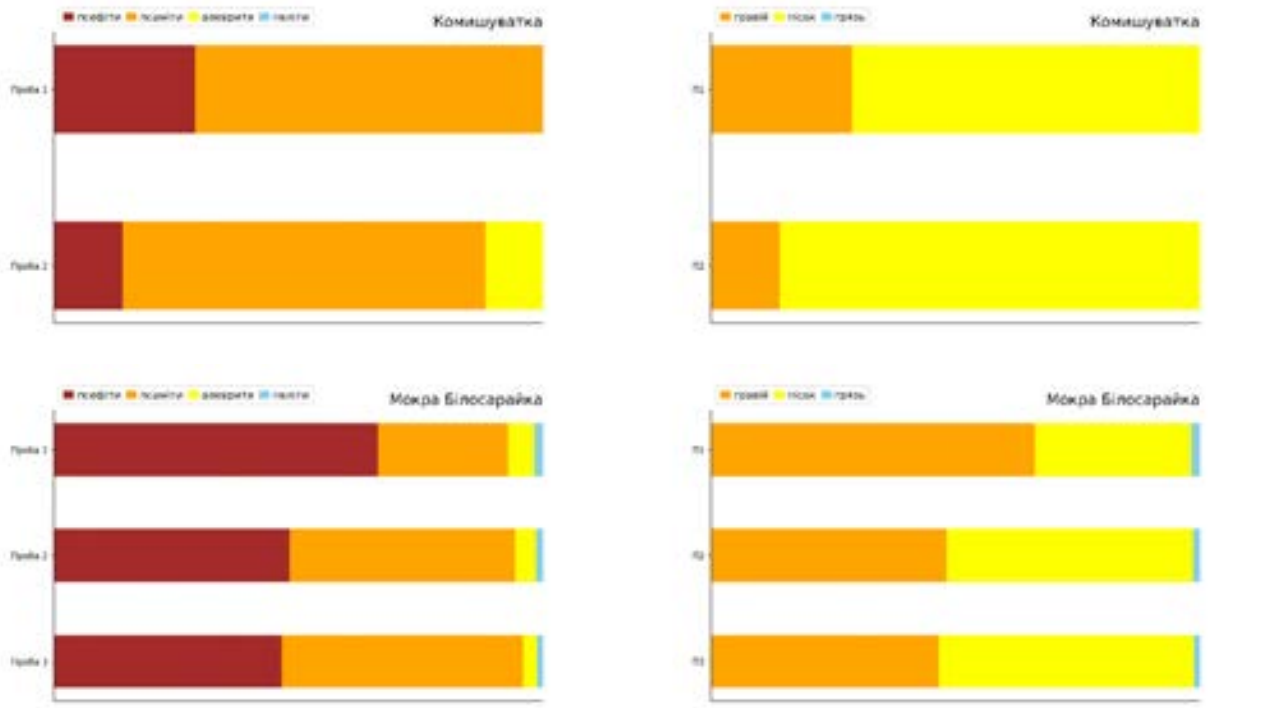
Існує велика кількість підходів до класифікації відкладів відповідно до їх гранулометричного складу. Більшість класифікацій спирається на співвідношення розмірних груп (агрегатів): гравій, пісок, глина, мул. Тому вони описані через трикутну залежність у вигляді трикутників. Як правило кожна наукова група, описуючи результати своїх досліджень, обирає найбільш доцільний підхід, спираючись на характеристики досліджуваного матеріалу та цілі свого дослідження.

Таблиця 2

Результати гранулометричного аналізу – діаграми співвідношень агрератів

За Фроловим	За Фолком
	
	
	
	

Продовження таблиці 2



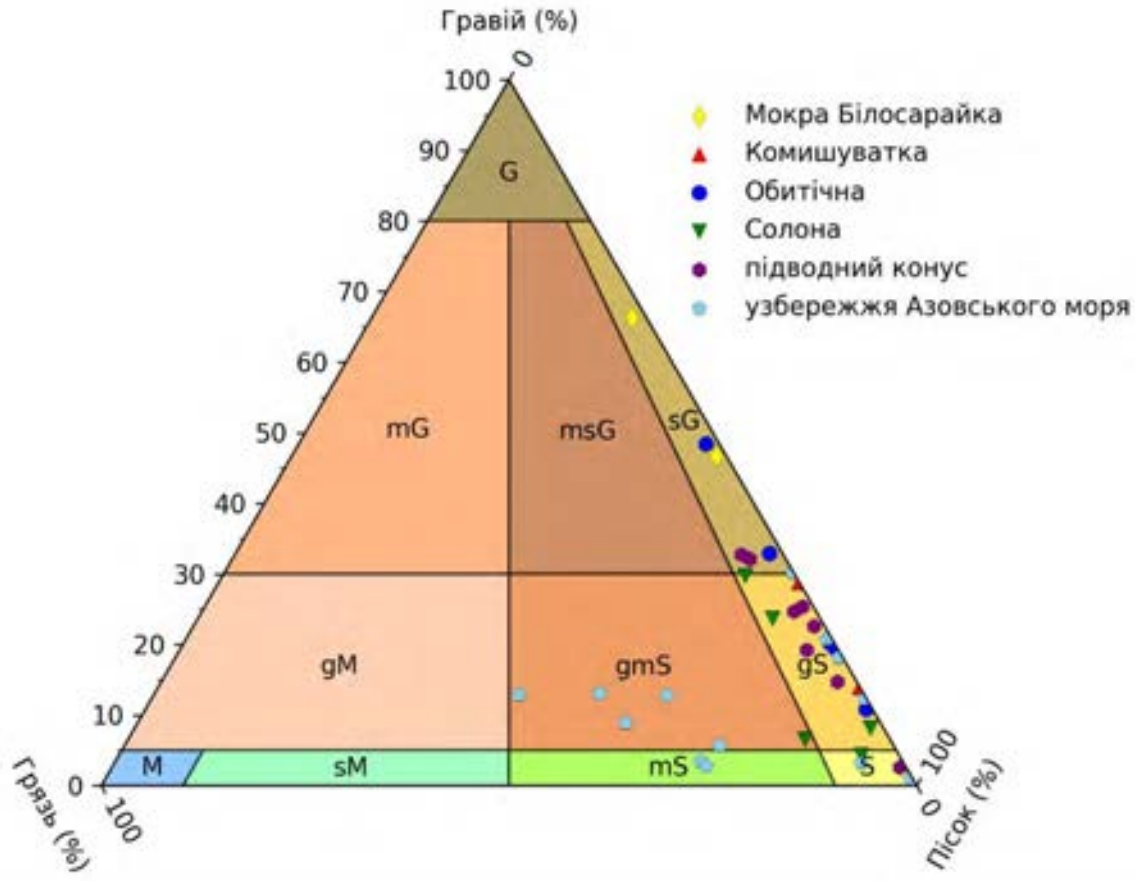


Рис. 3. Проби донних відкладів на трикутнику Фолка (11 класів) /
Fig. 3. Samples of bottom sediments on Folk's triangle (11 classes)



Рис.4. Проби донних відкладів на трикутнику Фолка (4 класи) /
Fig. 4. Samples of bottom sediments on Folk's triangle (4 classes)

В світовій науковій спільноті постає питання стандартизації результатів для того, щоб їх можна було порівняти між собою. Спираючись на закордонні практики було охарактеризовано донні відклади північного Приазов'я за спрощеним трикутником Фолка (виділяє 11 класів відкладів). Досліджуваний матеріал дуже строкатий. Найбільша кількість проб – 18 штук – відноситься до класу гравійний пісок, 7 проб до класу піщаний гравій, 6 – до класу гравійно-мулистий пісок, 5 – до класу пісок та 3 до класу мулистий пісок. Описані донні відклади – це переважно грубозернистий піщаний матеріал. Якщо брати до уваги лише результати гранулометричного аналізу, то вони вказують на такі седиментаційні процеси: матеріал мало транспортується, сили перенесення матеріалів недостатні для його подрібнення та ущільнення, матеріал мобільний, несортований та слабо накопичується – постійно розмивається та перевідкладається.

Сучасні літологічні дослідження в Україні потребують структурованих рекомендацій щодо інтерпретації та подання результатів, затвердження перекладів до термінів, запозичених з англомовної літератури з метою інтеграції до європейської наукової спільноти.

Список використаних джерел

1. *Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. The Journal of Geology, 30(5), 377–392. https://doi.org/10.1086/622910*
2. *Blott, S.J. & Pye, K. (2012) Particle size scales and classification of sediment types based on particle size distributions: review and recommended procedures. Sedimentology, 59, 2071-2096. https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2012.01335.x*
3. *Fournier-sowinski, J. (2024). Practical Handbook of Grain Size Analysis Principles and methods. Marine Station MNHN. https://doi.org/10.5281/zenodo.13836369*
4. *Valentine, P. C. (2019) Sediment classification and the characterization, identification, and mapping of geologic substrates for the glaciated Gulf of Maine seabed and other terrains, providing a physical framework for ecological research and seabed management. U.S. Geological Survey https://doi.org/10.3133/sir20195073*
5. *Шнюков, Є.Ф., Орловський, Г.М., Усенко, В.П., Григор'єв, О.В., & Гордієвич, В.А. (1974). Геологія Азовського моря. Наукова думка.*

6. *Shepard, F. (1954). Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. Journal Sedimentary Petrology, 24, 151-158. https://doi.org/10.1306/D4269774-2B26-11D7-8648000102C1865D*
7. *Ayodele, O.S. and Madukwe, H.Y. (2019) Granulometric and Sedimentologic Study of Beach Sediments, Lagos, Southwestern Nigeria. International Journal of Geosciences, 10, 295-316. https://doi.org/10.4236/ijg.2019.103017*
8 *Cutroneo, L., Carbone, C., Consani, S., & Capello, M. (2020). Sediment distribution on the continental shelf in relation to stream inputs and contamination: hydrodynamic, chemical, mineralogical, and sedimentological characteristics (Ligurian Sea, Italy). Environmental Science and Pollution Research, 27(35), 43755-43768. https://doi.org/10.1007/s11356-020-10259-4*
9. *Folk, R. L. (1954). The Distinction between Grain Size and Mineral Composition in Sedimentary-Rock Nomenclature. The Journal of Geology, 62(4), 344–359. https://doi.org/10.1086/626171*
10. *Folk, R. L. (1966). A review of grain-size parameters. Sedimentology, 6(2), 73–93. https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1966.tb01572.x*
11. *Moses, C.A., & Vallius, H. (2020). Mapping the Geology and Topography of the European Seas (European Marine Observation and Data Network, EMODnet). Quarterly. Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 54 (1), qjegh2020–131. https://doi.org/10.1144/qjegh2020-131*
12. *Schlee, J. (1973). Atlantic Continental Shelf and Slope of the United States sediment texture of the northeastern part. U.S. Geological Survey Professional Paper, 529-L. United States Government Printing Office https://doi.org/10.3133/pp529L*
13. *Long, D. (2006). BGS detailed explanation of seabed sediment modified Folk classification. MESH*
14. *Kaskela, A., Kotilainen, A., Alanen, U., Cooper, R., Green, S., Guinan, J., van Heteren, S., Kihlman, S., van Lancker, V., & Stevenson, A. (2019). Picking Up the Pieces—Harmonising and Collating Seabed Substrate Data for European Maritime Areas. Geosciences, 9(2), 84. https://doi.org/10.3390/geosciences9020084*
15. *Vallius, H., Kotilainen, A., Asch, K., Fiorentino, A., Judge, M., Stewart, H.A. & Pjetursson, B. (2020). Discover Europe's seabed geology. The EMODnet concept of uniform collection and harmonization of marine data. Geological Society, Special Publications. https://doi.org/10.1144/SP505-2019-208*
16. *Marenao. (2023, September 28). Classification of sediments based on grain size composition (Folk, 1954, modified). Geological Survey of Norway (NGU). https://www.ngu.no/Mareano/Grainsize.html*
17. *Kaskela, A. M., Kihlman, S., Kotilainen, A. T., Alanen, U. (2025, March 11-13). Harmonising seabed substrate data of European Seas - EMODnet Geology. [Conference poster]. EMODnet Geology Consortium, Oulu, Finland. https://oceandataconference.org/wp-content/uploads/2025/01/50_Seabed_poster.pdf*
18. *Kaskela, A. et al., (2025, March 10-13). EMODnet Geology: Compiling Marine Geological Data Sets to support sustainable development of marine areas [Conference poster]. IODC-III, Santa Marta, Colombia https://oceandataconference.org/postersession-iodc3/*
19. *Hunter J. D., (2007). Matplotlib: A 2D Graphics Environment. Computing in Science & Engineering, 9(3), 90-95. http://dx.doi.org/10.1109/MCSE.2007.55*
20. *Ikeda, Yu. (2024). yuzie007/mpltern: 1.0.4 (1.0.4). Zenodo https://doi.org/10.5281/zenodo.11068993*
21. *Михайлов, В.А., Пастушенко, Т.В., & Мірончук, Т.А. (2020). Словник геологічних термінів: українсько-російсько-англійський. ВПЦ «Київський університет»*
22. *Cambridge Advanced Learner's Dictionary & Thesaurus. Mud. In Cambridge Advanced Learner's Dictionary & Thesaurus. Retrieved March 3, 2020, from https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/mud*
23. *Словник української мови online. Грязь. В Словник української мови online. Взято 3 березеня 2025 з https://sum20ua.com/?page=689&searchWord=%D0%B3%D1%80%D1%8F%D0%B7%D1%8C&wordid=20421#*
24. *Степанов, В.Б., Побережська, І.В., Костюк, О.В., & Гнатів, І.Г. (2014) Методи вивчення осадових порід: методичні рекомендації до лабораторних занять і самостійної роботи студентів напряму підготовки 6.04.01.03 – геологія. Львівський національний університет імені Івана Франка.*
25. *Павлова, О.О., & Павлов, Г.Г. (2018). Базові терміни та поняття в літології: довідковий посібник з «Основ літології» для студентів 2 курсу за спеціальністю «Науки про Землю».*

Granulomertic classification of bottom sediments of small rivers of the northern Azov Sea region

Liudmyla Berozkina
Junior Researcher, SSI «Center for Problems of Marine Geology, Geoecology and Sedimentary Ore Formation of the NAS of Ukraine», Kryvyi Rih, Ukraine

ABSTRACT

Introduction. Grain size is a key characteristic in the study of bottom sediments. There are a large number of approaches to the classification of granulometric composition, but most of them were created for sedimentary rocks or soils, not sediments, so arises a problem of choosing an appropriate methodology for describing bottom sediments. The most common among researchers of bottom sediments is the Folk classification and its modifications. This approach is used by Geological Surveys of the USA and the countries of European Union for seabed mapping and research of bot-

tom sediments. Therefore, to characterize the bottom sediments of the northern Sea of Azov region, a simplified Folk classification was used. It consists of eleven classes and is represented through a three-term dependence. The generalized scheme consist of four classes.

Methods. Granulometric analysis was conducted by dry sieve method. Results were grouped according to two classification schemas (by Frolov and by Folk). Graphics were made with the Python programming language, libraries Matplotlib and MplTern.

Results and Discussions. Grain size distribution was calculated for 39 samples of bottom sediments from rivers the Obytichna, the Solona, the Mokra Bilosaraika, the Komyshuvatka, underwater discharge cone of the temporary steam in Petrivska ravine and from beach zone between cities Prymorsk and Berdyansk. Years of sampling 2017, 2018, 2021. A comparison is made of the traditional for Ukrainian lithological studies division into psephites, psamites, siltstones, and pelites with the division into sediment granulometric aggregates (gravel, sand, mud) according to the Folk scheme. Psephites is equal to gravel, pelites is equal to mud. Sand consist of psamites and siltstones. Folk's approach allows not only to demonstrate the percentage content of a certain group, but also to attribute the bottom sediment to a certain class based on its ratio. According to Folk's triangle: all samples from the Mokra Bilosaraika river are sandy gravel; bottom sediments of the Komyshuvatka are gravelly sand; the Obytichna river – three samples of gravelly sand and two samples of sandy gravel; the Solona river – tree gravelly sand, one sand and one gravelly muddy sand; samples from underwater discharge cone are mostly gravelly sand, but two of them sandy gravel and one is sand; coastline samples are five gravelly sand, five gravelly muddy sand, three sand and two muddy sand. If classified according to a generalized scheme, the vast majority of the studied material is coarse sediments, with a small amount of mixed, sandy sediments and occasional samples of mud with muddy sand.

Conclusions. The studied sediments are predominantly coarse-grained sandy material. If we take into account only the results of granulometric analysis, they indicate the following sedimentation processes: the material is poorly transported, the forces of material transfer are insufficient for its crushing and compaction, the material is mobile, unsorted and poorly accumulated - it is constantly eroded and redeposited. Modern lithological studies in Ukraine require structured recommendations for the interpretation and presentation of results, approval of translations of terms borrowed from English-language literature for the purpose of integration into the European scientific community.

Keywords*: granulometric analysis, bottom sediments, three component granulometric model, sediment class, sediment aggregate, classification by Folk, small rivers, the Azov Sea.*

References

1. *Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. The Journal of Geology, 30(5), 377–392. https://doi.org/10.1086/622910*
2. *Blott, S.J. & Pye, K. (2012) Particle size scales and classification of sediment types based on particle size distributions: review and recommended procedures. Sedimentology, 59, 2071-2096. https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2012.01335.x*
3. *Fournier-sowinski, J. (2024). Practical Handbook of Grain Size Analysis Principles and methods. Marine Station MNHN. https://doi.org/10.5281/zenodo.13836369*
4. *Valentine, P. C. (2019) Sediment classification and the characterization, identification, and mapping of geologic substrates for the glaciated Gulf of Maine seabed and other terrains, providing a physical framework for ecological research and seabed management. U.S. Geological Survey https://doi.org/10.3133/sir20195073*
5. *Shniukov, Ye.F., Orlovskyi, H.M., Usenko, V.P., Hryhoriev, O.V., & Hordiievych, V.A. (1974). Geology of the Sea of Azov. Naukova dumka. [in Russian]*
6. *Shepard, F. (1954). Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. Journal Sedimentary Petrology, 24, 151-158. https://doi.org/10.1306/D4269774-2B26-11D7-8648000102C1865D*
7. *Ayodele, O.S. and Madukwe, H.Y. (2019) Granulometric and Sedimentologic Study of Beach Sediments, Lagos, Southwestern Nigeria. International Journal of Geosciences, 10, 295-316. https://doi.org/10.4236/ijg.2019.103017*
8 *Cutroneo, L., Carbone, C., Consani, S., & Capello, M. (2020). Sediment distribution on the continental shelf in relation to stream inputs and contamination: hydrodynamic, chemical, mineralogical, and sedimentological characteristics (Ligurian Sea, Italy). Environmental Science and Pollution Research, 27(35), 43755-43768. https://doi.org/10.1007/s11356-020-10259-4*
9. *Folk, R. L. (1954). The Distinction between Grain Size and Mineral Composition in Sedimentary-Rock Nomenclature. The Journal of Geology, 62(4), 344–359. https://doi.org/10.1086/626171*
10. *Folk, R. L. (1966). A review of grain-size parameters. Sedimentology, 6(2), 73–93. https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1966.tb01572.x*
11. *Moses, C.A., & Vallius, H. (2020). Mapping the Geology and Topography of the European Seas (European Marine Observation and Data Network, EMODnet). Quarterly. Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 54 (1), qjegh2020–131. https://doi.org/10.1144/qjegh2020-131*
12. *Schlee, J. (1973). Atlantic Continental Shelf and Slope of the United States sediment texture of the northeastern part. U.S. Geological Survey Professional Paper, 529-L. United States Government Printing Office https://doi.org/10.3133/pp529L*
13. *Long, D. (2006). BGS detailed explanation of seabed sediment modified Folk classification. MESH.*

14. *Kaskela, A., Kotilainen, A., Alanen, U., Cooper, R., Green, S., Guinan, J., van Heteren, S., Kihlman, S., van Lancker, V., & Stevenson, A. (2019). Picking Up the Pieces—Harmonising and Collating Seabed Substrate Data for European Maritime Areas. Geosciences, 9(2), 84. https://doi.org/10.3390/geosciences9020084*
15. *Vallius, H., Kotilainen, A., Asch, K., Fiorentino, A., Judge, M., Stewart, H.A. & Pjetursson, B. (2020). Discover Europe's seabed geology. The EMODnet concept of uniform collection and harmonization of marine data. Geological Society, Special Publications. https://doi.org/10.1144/SP505-2019-208*
16. *Marenao. (2023, September 28). Classification of sediments based on grain size composition (Folk, 1954, modified). Geological Survey of Norway (NGU). https://www.ngu.no/Mareano/Grainsize.html*
17. *Kaskela, A. M., Kihlman, S., Kotilainen, A. T., Alanen, U. (2025, March 11-13). Harmonising seabed substrate data of European Seas - EMODnet Geology. [Conference poster]. EMODnet Geology Consortium, Oulu, Finland. https://oceandataconference.org/wp-content/uploads/2025/01/50_Seabed_poster.pdf*
18. *Kaskela, A. et al., (2025, March 10-13). EMODnet Geology: Compiling Marine Geological Data Sets to support sustainable development of marine areas [Conference poster]. IODC-III, Santa Marta, Colombia https://oceandataconference.org/postersession-iodc3/*
19. *Hunter J. D., (2007). Matplotlib: A 2D Graphics Environment. Computing in Science & Engineering, 9(3), 90-95. http://dx.doi.org/10.1109/MCSE.2007.55*
20. *Ikeda, Yu. (2024). yuzie007/mpltern: 1.0.4 (1.0.4). Zenodo https://doi.org/10.5281/zenodo.11068993*
21. *Mykhailov, V.A., Pastushenko, T.V., & Mironchuk, T.A. (2020). Vocabulary of geological terms: Ukrainian-russian-English. VPTs «Kyivskyi universytet» [in Ukrainian]*
22. *Cambridge Advanced Learner's Dictionary & Thesaurus. Mud. In Cambridge Advanced Learner's Dictionary & Thesaurus. Retrieved March 3, 2025, from https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/mud*
23. *Ukrainian language dictionary online. Mud. In Ukrainian language dictionary online. Retrieved March 3, 2025, from https://sum20ua.com/?page=689&searchWord=%D0%B3%D1%80%D1%8F%D0%B7%D1%8C&wordid=20421# [in Ukrainian]*
24. *Stepanov, V.B., Poberezhska, I.V., Kostiuk, O.V., & Hnativ, I.H. (2014) Methods of studying sedimentary rocks: methodological recommendations for laboratory classes and independent work of students of the direction of training 6.04.01.03 - geology. Lvivskyi natsionalnyi universytet imeni Ivana Franka. [in Ukrainian]*
25. *Pavlova, O.O., & Pavlov, H.H. (2018). Basic terms and concepts in lithology: a reference guide to "Fundamentals of Lithology" for 2nd year students majoring in "Earth Sciences" [in Ukrainian]*

Received 16 July 2025
Accepted 27 October 2025

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-02
UDC 622.841:622.847:556.3
Received 12 October 2025
Accepted 17 November 2025

Groundwater level modeling during the coal mines´ decommissioning

Kateryna Boiko [1]
PhD (Hydrogeology), Senior Researcher,
[1] State Institution "The institute of Environmental Geochemistry of National Academy of Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine,
e-mail: boyko_ekateruna@ukr.net, https://orcid.org/0000-0001-5269-3919;
Oleg Ulitskiy [1]
DSc (Geology), Acting Head of the Department of Environmental Geology and Thermodynamics of Geospheres,
e-mail: olegulytsky@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-2674-2208;
Pavlo Boiko [1]
Senior Engineer,
e-mail: pasha_boyko@ukr.net, https://orcid.org/0009-0009-8995-5199

ABSTRACT

Problem Statement and Purpose. Abandoned or non-operating coal mines that were closed due to flooding pose environmental hazards, primarily due to the risk of groundwater contamination, subsidence, and waterlogging of surrounding areas resulting from flooding and rebounding groundwater levels. Estimating the risk of flooding with the help of the numerical hydrogeological modelling for areas inhabited by coal mines that were built at the beginning of the last century is challenging, since information on operational parameters (such as mine workings' features, pumping rates, etc.), has not been preserved to date or is limited. A study examined the capabilities of groundwater flow numerical modelling in predicting groundwater rebound and its accuracy in areas surrounding old, closed coal mines.

Data and Method. As pilot study areas, the Saxony coal mine region (Germany) and the Central Donbass (Ukraine) coal mines group area were established. Both pilots integrate more than 20 minefields of former interconnected coal mines with more than 100 years of mining history and a similar excavation method. In this study, the numerical modelling software packages were used as a tool for the numerical groundwater flow simulations and predictions in a three-dimensional groundwater system of coal mines areas. All of them contain a three-dimensional (3D), finite-element groundwater flow code. Additionally, adjustments in the form of calculation decisions (such as sensitivity analysis and multivariate simulations on a block-simplified model) were developed and implemented to address hydraulic system parameter uncertainties and the insufficiency of historical mining data (lack of pumping rates information, number of mining horizons, mine workings features, and geometry).

Result and discussion. This study demonstrates the conceptual approach and numerical groundwater flow evaluation for the condition in which pumping isn't maintained and no dewatering measures are provided in the area to prevent flooding at the critical level. The developed numerical hydrogeological model covers all common steps of precise and complete numerical simulations, including transient conditions simulations, that reconstruct the full range of mining stages during the mines' life. The special methodology of calibration was adjusted for this purpose – the cycle of steady-state, transient, and prediction simulations of the groundwater level until the lowest possible RMSEs between observed and simulated groundwater levels in the model were achieved.

Keywords*: non-operational coal mines, groundwater rebound, groundwater numerical modelling, conceptual hydrogeological model, drain nodes hydraulic condition, hydrogeological parameters.*

In cites: Boiko Kateryna, Ulitskiy Oleg, Boiko Pavlo (2025). Groundwater level modeling during the coal mines´ decommissioning. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 23-34. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-02

1. Introduction. The numerical modeling has been extensively tested recently as a tool for predicting hydrogeological problems associated with mines flooding at the pilot sites in countries where the typical situation with abandoned coal mines takes place – England, China, Ukraine, Germany, and Spain. The reason we need to use numerical hydrogeological modeling at sites like old worked-out coal mines (Ukraine, Germany) is that modern scientific approaches can simulate groundwater level rebound, predict flooding, and address data gaps on the technical parameters of the mineral extraction process. The range of environmental issues posed by coal underground mining includes soil degradation, pollution of groundwater and surface water, and surface subsidence, which occur during the operational period and continue into the postmining period. Partly, deformational subsidence zones forming during the postmining period are caused by groundwater table recovery and iterative changes in the pore-fluid pressure state in the rock mass. The rock mass, characterized by significantly altered mechanical and groundwater conductivity properties during caving and extraction, exhibits reduced resistance to geostatic pressure during uncontrolled flooding in mines and during groundwater table recovery [1]. Assessing the risks of area flooding due to the groundwater rebound during the postminig period as for coal mines that were operating from the beginning of last century and were closed also then proved to be very difficult [2], especially when high-risk sites are flooded [3], because infor-

© Boiko Kateryna, Ulitskiy Oleg, Boiko Pavlo, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

mation about the condition of mine workings, the presence and features of voids and the integrity of the worked-out space, and then about operational parameters such as the intensity of excavating, the number of worked-out seams and the depth step, has not been preserved to our times, or is limited. Hence, what is common for `usual` parameters for the transient calibration, namely, parameters of `historic stresses` for the groundwater flow during the excavation, seems to be unknown. Moreover, transient calibration cannot be performed on some preliminary models, as the following predictions for groundwater rebound may fail. On this basis, some solutions that apply analytical and mapping approaches, as well as the decision to use transient calibration during modelling of the area of old (in some cases, abandoned) mine workings, were developed. It was first tested in the Central Donbas area, where the groundwater rebound process is more detectable and visible nowadays, and then proposed for groundwater level prediction at the Lugau-Oelsnitz coalfield (the Saxony mining region).

In contrast to half-analytical and box-type models previously developed for the Saxony mining region [4] and for other mining regions across the EU, the numerical groundwater flow model enables the reconstruction of the specific features of groundwater behavior within the entire desired catchment area, including coal mine fields. The latter has been demonstrated by the example of a numerical groundwater model, built for the Central Donbass study area [5, 6], the finite difference numerical models of groundwater flow throughout the entire life cycle of the Western Donbass area, taking into account the stochastic heterogeneity of disturbed rock masses, were proposed and tested in the following works [7, 8].

2. Materials and Methods

Study Areas. In the Toretsk-Yenakiieve mining and urban agglomeration (which is geographically linked to the Central Coal Mining Region of Donbas, Fig. 1), 28 mines were operating before the restructuring of Ukraine's coal industry, most of which were constructed in the early 19th century. Today, more than 90% of the mines in the agglomeration are flooded. Only the mines of the “Toretskvuhillya” State Enterprise remained operational until early 2022. Due to military operations, mines are switching to emergency mode, leading to uncontrolled flooding and potentially significant disturbances in the area's hydrogeological regime, groundwater contamination, and extensive flooding.

The hydrogeological stratification scheme of the studied territory is represented by aquifers of modern and Upper Quaternary alluvial deposits of floodplains, first supra-floodplain terraces and valley bottoms (a, adQ_{III-IV}), undivided Lower-Upper Quaternary aeolian-deluvial deposits (vd Q_{I-III}), as well as the aquifer complex of Upper and Middle Carboniferous deposits (C_2-C_3) [5].

The Lugau-Oelsnitz coalfield region (Fig. 2) is one of the large coal deposits' industrial sites in south-west Saxony (Germany), which has been mined continuously. Namely, the region was renowned for its coal deposits and significantly shaped Germany's industrial revolution and economic growth in the 19th century [9] and achieved a production capacity surpassing 2 million tonnes of extraction produced by the 11 coal trades, reaching an excavation depth of 800-900 m [10] by the beginning of the 20th century.

The geological structure in the study area belongs to the Permo-Carboniferous formation, while the stratigraphical cross-section is built from Ordovician, Carboniferous, Permian, and Cenozoic deposits. Productive coal seams compose the upper Carboniferous formation, which is presented as coarse and fine sandstones with layers of claystone and siltstone in grey facies. The Permian Rotliegend is the thickest unit in the study area [11], consisting of a distinctive alternating sequence of conglomerate, siltstone, and mudstone, thin lacustrine carbonates, pyroclastic horizons, and alternating layers of siltstone, medium- and coarse-grained sandstone. The Carboniferous-Permian boundary is marked by the occurrence of the "grey conglomerate" of the Lower Rotliegend. Similar to the Carboniferous units, the Rotliegend sediments represent erosion debris, which, after a long period of dormancy in the Upper Carboniferous, accumulated in an overlying Rotliegend depression formed above it.

Thus, the upper part of the Rotliegend (Müsseln formation) may play the most crucial role in groundwater recharge zones and groundwater storage. The permeability of Mussel formation can reach 10^{-4}-10^{-5} m/s in some cases [12].

Upper Carbon layers and deposits of the Haertensdorf formation are considered low-permeability deposits and are classified as an aquitard, as are volcanic and siltstone deposits of the Planitz formation. Ordovician phyllites are characterized by low permeability properties (permeability – 10^{-9}-10^{-7} m/s). That's why in hydrogeological modelling, they serve as the last division of the hydrogeological system without assuming the discharge into the upper layers.

Mining features. The group of Central Donbass mines is characterised by the exploitation of the geological environment of most coal mines in the region throughout the entire period of operation, to maximum depths of 1,000-1,300 m (-1,000 -1,100 masl.), and by a total volume of excavated space of 705 thousand m^3. The total mine water inflow amounted to 193.8 thousand m^3/day.

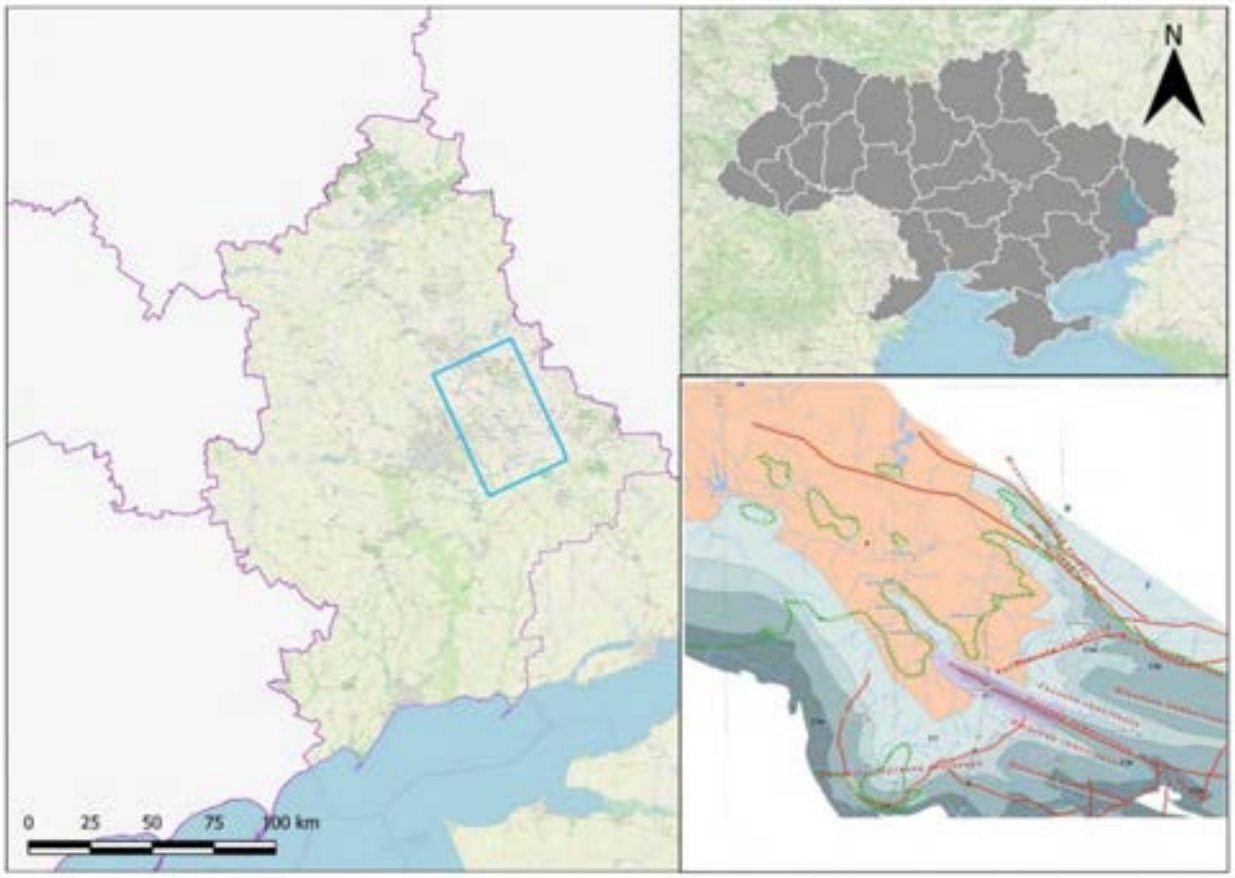


Fig. 1. The location of the Central Coal Mining Region of Donbas study area
(including the geological extract in the lower right frame)



Fig. 2. The location of the Lugau-Oelsnitz study area (Base map – the Precenozoic geological map – the source: https://www.luis.sachsen.de/fachbereich-geologie.html)

The excavation within the Lugau-Oelsnitz coal field expanded through the carbon operational layers (coal seams). It covered the depth interval from the absolute mark +180 m a.s.l. to the absolute mark -450 m a.s.l. The average thickness of coal seams varies from 0.5 m to 5.0 m. Mining operations took place at 21 primary mines and operational cross-sections.

According to the calculations, provided by Dr. M. Eckart [4] a raw volume of 150 million m³ can be considered as a total volume of extracted deposits, while only 30% - 45-47 million m³ - of that volume, considering the reduction of the initial volumes by subsidence and backfilling, that happened during the mining history, may be used as a defining value of the residual underground volume and could be reasonable for the prediction calculations of mines flooding.

According to the long history of mining, mining plans and other technical parameters, such as pumping rates, groundwater inflows to the mining horizons, the location of horizons and horizon depth intervals, as well as production progress for each period of time, etc., are not saved. Hence, no reference information for the water rates information in the form of groundwater inflows into the mine workings, nor in the form of pumping rates recorded values, exists. To estimate the importance of the numerical modelling calibration criteria, which, in normal database conditions, act as measured inflow rates during the mining stage, the approach described below was developed.

Modelling tools and approaches. To simulate the groundwater rebound process, recent worldwide scientific studies [13, 14, 15] employ a numerical model that integrates various hydrogeological parameters of a three-dimensional hydrogeological system, including void storage information, water inflows during the excavation or pumping records, as well as hydrogeological data – the strata permeability, porosity, and storativity, etc. By inputting these parameters, the numerical model predicts the spatial and temporal distribution of groundwater recharge and enables the estimation of geofiltration parameters, as well as the effects of fluctuations in water budget components, in a post-mining groundwater system [16] and during groundwater table rise. These predictions are critical for anticipating potential environmental risks and formulating appropriate management strategies for water management and ecological sustainability.

In this study, the numerical modelling software packages were used as a tool for the numerical groundwater flow simulations and predictions in a three-dimensional groundwater system of coal mines areas. All of them contain three-dimensional (3D), finite-element groundwater flow code (equations). They are used worldwide to design dewatering or depressurization systems, predict local and regional environmental impacts of mine dewatering, and to solve various popular hydrogeological issues.

Whereas the 3D numerical modeling requires the incorporation of mine workings` features plans in addition to geological (hydrogeological) structure scheme, the scientific approach proposed and described in the article substantiates the possibility of using drains nodes for the transient calibration to simulate the extraction stage and corresponding groundwater table drawdown, the subject to appropriate calibration with a known amount of water inflow into the mine workings. It is a reasonable argument that the restoration of groundwater levels in a coal basin depends not only on the cavity. Throughout all stages – both excavation and mine closure – groundwater inflow velocity and volume are key factors in understanding the drainage of aquifers within the coal fields' catchment areas [5, 15].

The study presents the results of a numerical experiment, based on a deterministic model, to calculate the time required to flood a 100-meter-thick rock strata (reflecting the typical step between the horizons of mine workings in the Central Donbas region).

The physical character of the experiment's conclusion enables to state that the amount of water inflow into the mine, which can be determined by the modified Darcy‘s formula (1) [17], is the main operating parameter of the positive water balance during the modeling of groundwater level rebound, but taking into account the increased hydraulic conductivity due to the intensification of man-made fracturing of coal rocks during the caving.

$$Q_i = KF\frac{\Delta H}{m_0}, \quad (1)$$

where K – the hydraulic conductivity, m/day; F – the filtration area, sq m, m_0 – the aquitard thickness, m, ΔH – the hydraulic head difference, m.

Groundwater inflow rates also served as a criterion for the model calibration, after they were calculated for each drain node, as a proposed missing transient simulation parameter – mine workings' plans – at the Lugau-Oelsnitz coal-field site. The rebound phenomenon occurs when these voids are slowly refilled with groundwater after mining ceases, leading to a 'rebound' of the water table towards its pre-mining position. Thus, the process of groundwater rebound should be considered to consist of several stages and hydrodynamic processes – mine workings flooding (which is mainly subject to the laws of hydraulics) and groundwater table recovery to the priming stage (which is subject to the laws of geofiltration).

Setting up a numerical experiment to validate geofiltration conditions. A deterministic hy-

drogeological model was created during the research, reflecting the actual geological structure of the section at a specific interval between working horizons of the "Central" mine ("Toretsvugillya" State Enterprise, Toretsk), allows assessing the nature of the interaction between the "mine workings – groundwater – rock mass" system in terms of the flooding of mine workings at the inter-horizontal interval and determine the degree of influence of changes in the coefficient of voids filling (C_f) and the hydraulic conductivity (K) and other parameters of geofiltration on the rate of water saturation of a 100-metre-thick rock mass with existing mine workings (Fig. 3).

The interval between the mining horizons of 816 m and 916 m of the "Central" mine was analysed. Within the specified interval, the total volume of mine workings, the geometry of which can be accurately reproduced, is 2% of the calculated cube of the rock mass, the volume of which is $3 \cdot 10^8$ m^3. This value was obtained based on information about the location and area of the mining workings at the horizon. Hydraulic boundaries were set due to the tectonic structures (non-permeable fractures) around the mine fields, so that the only sources of groundwater recharge are inflows from adjacent aquifers and infiltration. The aquifer system is represented by sandstones of series C_2^5, C_2^6, and C_2^7. According to the results of formation tests conducted within the research area [18], aquifers at depths of 816 and 916 m are associated with the zone of slow water exchange. They are characterised by hydraulic conductivity values of 0.0015-0.0004 m/day.

First, the amount of inflow on the horizon 916 m

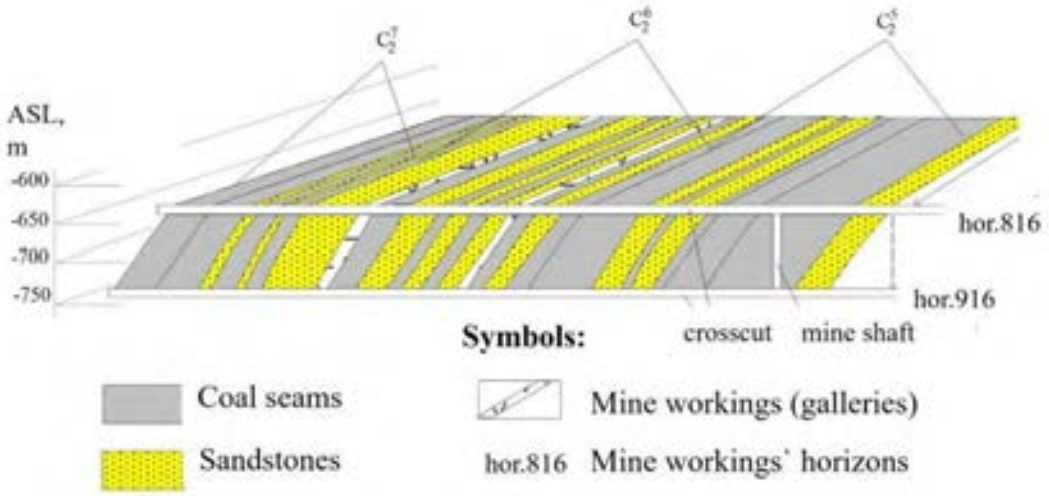


Fig. 3. Scheme of a deterministic hydrogeological model developed for a rock block at an horizon interval of 100 m with an approximation by a finite difference mesh

with the help of Eq.1 was estimated. The obtained value (1215 m^3/day) is well correlated with the recorded long-term average inflow. The flooding simulation was performed using a groundwater inflow value estimated from the total water inflow. The time interval was set at 30 days, and the model was stationary, reflecting the period of disconnection of the hydrogeological conditions of the mine workings as a disturbing factor. An additional geofiltration parameter was used – the specific yield coefficient, taken from the literature on the study of the hydrogeological conditions of the territory, 0.0012 [18].

The results obtained were compared with the current observed groundwater level data. Based on a graphical analysis of actual observations of rising groundwater levels in mines of the southern wing, as well as a comparison of the calculated (Eq.1) and the exact time of flooding of inter-horizon intervals using the example of the mines of the Gorlovka-Yenakiieve group, it was established that the current rates of mine flooding are pretty compatible with the hydraulic conductivities, which are increased relative to natural ones. After all, the average calculated groundwater rebound time for the studied group of mines (taking into account recalculating the groundwater level rise time for some intervals at a 100 m thickness) is 185 days. In contrast, the average actual rebound time for the specified thickness is 138 days. This acceleration in the rate of groundwater level rise is explained by an increase in the permeability of the rock mass around the mine workings, resulting from prolonged undermining by extraction operations.

To assess the degree of influence of increased hydraulic conductivity or porosity of the rock mass on the acceleration of mine flooding and rising groundwater tables, a sensitivity test was performed for the specified parameters. The dependencies shown in the first graph (Fig. 4a) indicate a significant acceleration in the flooding rate as hydraulic conductivity changes. Thus, at the maximum (within the range of the given values) hydraulic conductivi-

ty (K = 0.03 m/day) and at a constant volume of the excavated space (V=6635.8 thousand m^3, coefficient of voids filling C_f=1), the flooding time increases from the calculated 180 to 120 days.

At the same time, the maximum deviation of the flooding time at the accepted maximum filtration coefficient (K=0.03 m/day) when the filling coefficient C_f changes from 1 to 0.38 is only 15 days (flooding acceleration by 15 days) (Fig. 4b). Thus, the calculation model is more sensitive to changes in the hydraulic conductivity, which characterises the rock mass as a whole within the mine field and is taken into account in further calculations.

The experiment setup and its results, verified

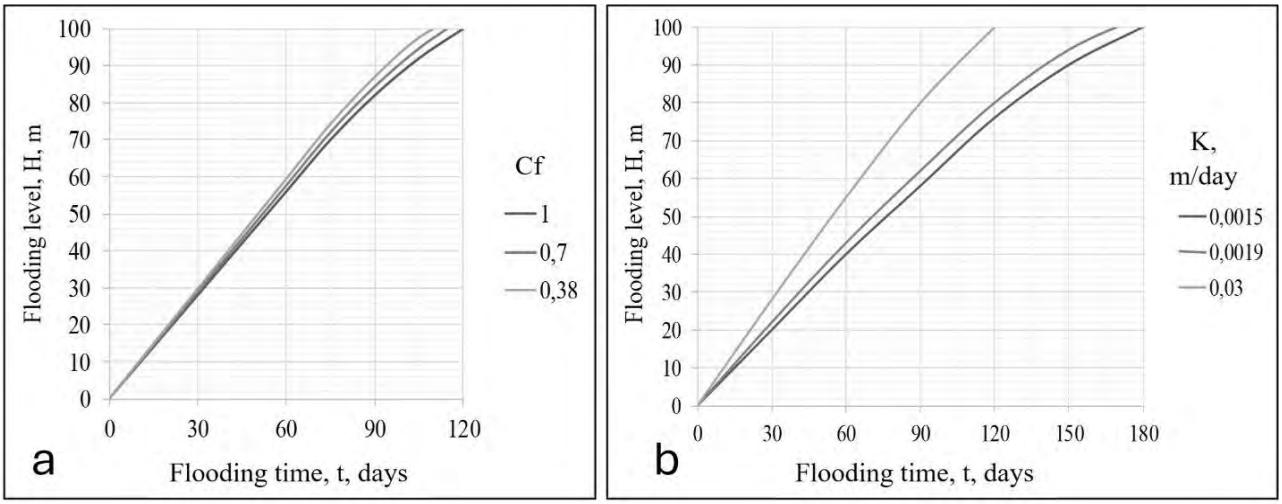


Fig. 4. a – the graph demonstrating how the flooding time of a 100-metre block of rock mass varies with different values of hydraulic conductivity (0.03; 0.0019; 0.0015 m/day) and with the coefficient of voids filling C_f =1; b – the graph demonstrating how the flooding time of a 100-metre block of rock mass varies with different values of C_f (1; 0.7; 0.38) and at K=0.03 m/day

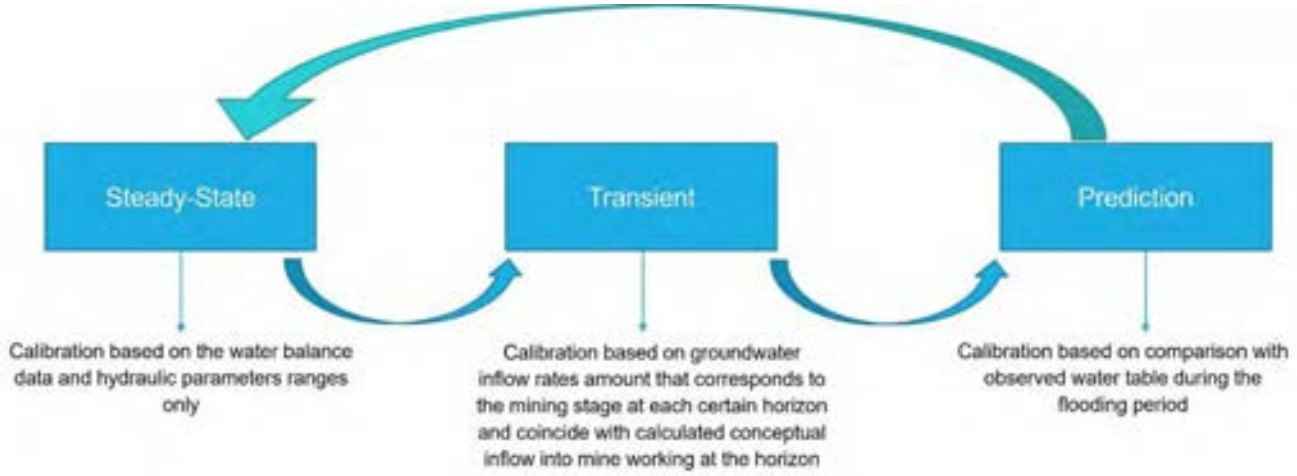


Fig. 5. Scheme of the generally accepted sequence of numerical hydrogeological modelling, taking into account the specifics of calibration in conditions of insufficient input data

by actual data on tracked flooding (groundwater levels recorded marks) using a semi-analytical numerical hydrogeological model, demonstrate the importance of considering and calibrating the hydraulic conductivity within the 3D geological space above the mine workings. The transient simulation of groundwater level dropping (that actually happened in the past but is necessary to be performed as a transient simulation stage), considering the statement above, may be a subject of inflow rates (within drain nodes) calibration into the drain network designed for each working horizon and serving as a hydraulic head boundary during the excavation.

Setting up the numerical flow model for the Lugau-Oelsnitz coal mines area. The area of a constructed numerical model corresponds to a polygon with a maximum 7,8 km spreading from the North to South, and a maximum of 11 km in the W-E direction. The total model domain area is 48 km^2. It includes 20 blocks that correspond to the coal mines fields. Model hydraulic boundaries include surface zoning into precipitation recharge zones,

constant-head boundary conditions, and river boundaries. Direct recharge by infiltration of precipitated water occurs throughout the basin considered in the numerical model.

Steady-state simulation. Steady-state simulations were performed to specify initial hydrogeological parameters of the inner hydrogeological structure and to establish the natural groundwater flow distribution (groundwater levels), based on the known topography, 3D geological/hydrogeological structure, and known water balance components.

Transient simulation. Transient simulations were conducted to reproduce the mining period and model the maximum groundwater drawdown resulting from mining operations in the investigated area.

The coal layer of the numerical hydrogeological model comprises elements of the 11th operational coal seams that were mined during the operational period at the study area. The lowest operational coal seam, "Kneisel Flöz", and the upper productive seam, "Grund flöz" are presented at the central and western part of the area, and according to the geological layering and dip direction, were mined at the final stage of the operational period. Whereas mines located in the eastern part of the area were processing the upper group of the carbon deposits in the coal seams "Neuflöz 1-4", "Öberflöz", "Hoffnungföz". This conceptual understanding enables the development of ideas about the mine's life cycles and their average periods, including the number of productive horizons within operational stages.

The duration of the transient simulations corresponds to the supposed time frame of the mining operational period at the Lugau-Oelsnitz mining area, which took place from approximately 1860 to 1871 and 1971. The mining operations were simulated with the help of drains nodes. Drains nodes are considered as zero-pressure conditions. Each drain was included in the simulation at a specific time (60 drains in total), corresponding to the start of the new mine-horizon excavation stage.

As long as any mining plan has not been preserved till the present time, the mining schedule and drains locations were established according to the

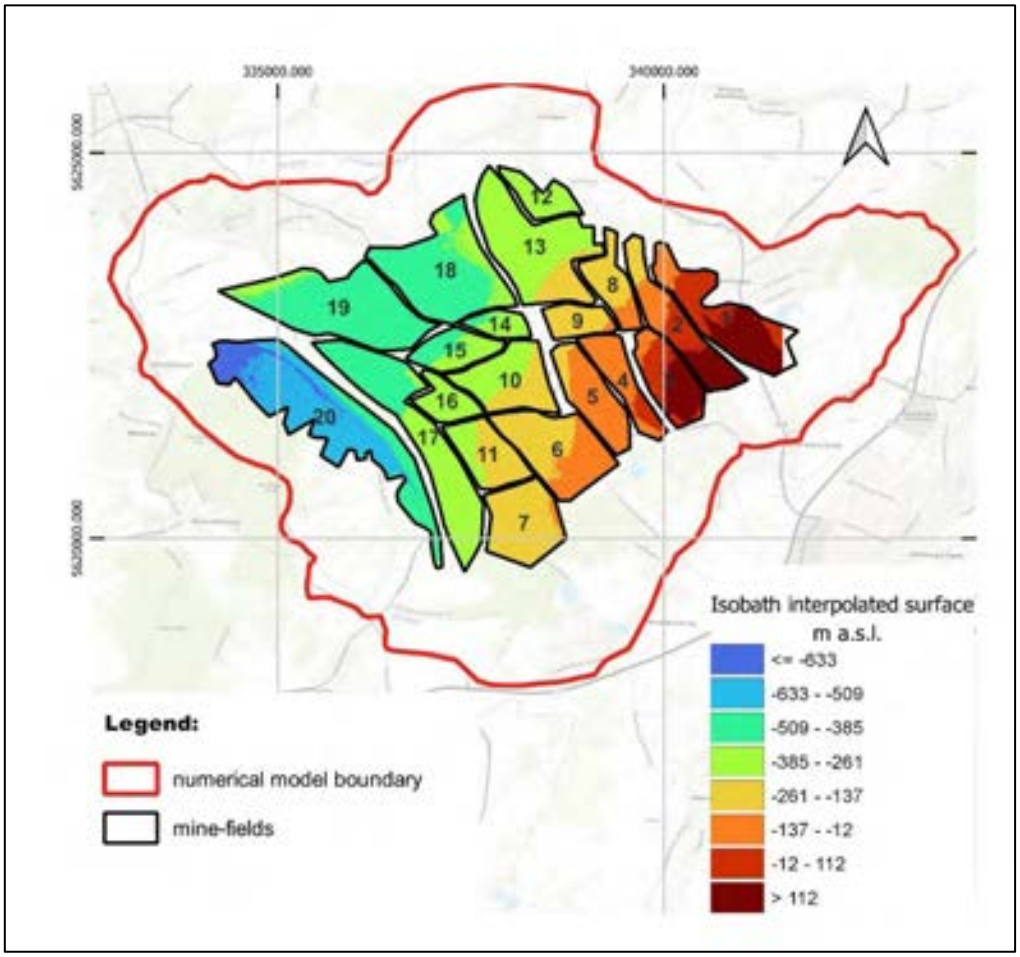


Fig. 6. Natural interpolated distribution of isobath surfaces created to assign drain nodes

following approach. For these purposes, every coal seam layer was interpolated within the mining field (block) and classified based on the natural distribution of depth interval divisions. The location of potential drains at each interval corresponding to the operational coal seam distribution was chosen as the geometrical center, and the relevant groundwater inflow rates were calculated based on the area and

interval thickness.

The groundwater inflow rate equivalent for each drain is calculated as shown in Table 1.

Where:

- Area – is an area of coal seam interval within each block, estimated based on the interpolated surface;
- Q by area – the inflow rate calculated with the seam thickness assumed based on the geometries of coal seams, and the area, established on interpolated surfaces;
- Voids Volume – the volume from the initial information on existing residual volumes, recalculated for the identified depth interval;
- Q by Volume – the inflow rate calculated based on information on residual volumes;
- Average interval of each stage of mining – 10 years. This period was established based on the duration of "operation life" at each mine and the maximum depth of each mine.

Table 1

The groundwater inflow to the mining interval calculation example

Block No.	Depth Interval, masl	Area, km^2	Q m^3/day by area	Voids Volume, m^3	Q m^3/day by Volume
20	-512 – -641	1.8	246	1350500	370

Predictive simulations. Predictive simulations were carried out to reconstruct the phase related to the start and duration of mine working flooding, and to compare the obtained groundwater level recovery velocity with measurements from monitoring observation wells. Results from predictive simulations were obtained and compared with groundwater rebound velocities observed in 2003 and 2014 for two monitoring wells. The predictive simulation involved 211 time-step intervals. In physical terms, the duration of predictive simulations corresponds to the time interval from 1971 to 2061.

3. Results and discussion. Based on steady-state conditions simulations, the hydrogeological parameters of the major hydrogeological units were derived. Initially, parameters were obtained from the literature review [12, 19, 20].

The main calibrating criteria in a steady-state simulation were a convergence with conceptual water balance components. Though the uncertainties in some values still exist, such as river baseflow measurements (it was possible to check the appropriateness of calculated baseflow for the river Würschnitz only, as a referencing parameter was given by Kolitsch, S. 2008 [19]), the general distribution of the water balance components satisfies the features of the groundwater system.

This is demonstrated by the fairly accurate water balance inputs obtained during calibration in the Lugau-Oelsnitz study area (Table 2).

Though uncertainties in some values still exist, such as river baseflow measurements (it was possible to check the appropriateness of calculated baseflow for the river Würschnitz only, as a referencing parameter was given [19]), the overall distribution of water balance components corresponds to the characteristics of the groundwater system (Fig. 7).

In general, the depth to the groundwater table within the area of investigation ranges from 0,5 to 2 m, which could indicate the permanent effect of hydraulic boundaries unaffected by the mining operations. From initial sets of simulations, it can be observed that the maximum groundwater level drawdown occurs at +175 m a.sl., at a depth of 147 m below the surface. The maximum drawdowns are related to the East-centre part of the investigated area. The simulation results also show that the process of groundwater table rebound was completed between 2014 and 2017, when natural absolute levels, similar to the modelled initial levels, were achieved (Fig. 4). Thus, the process of groundwater rebound might have lasted 43-46 years. The position of the groundwater level (2018-2020, according to the predictive simulation results) at the eastern bor-

Table 2

The water balance components calculated based on the numerical simulations and obtained from the conceptual model

	Conceptual value	Numerical model value
Recharge, m^3/s	0.26	0.18
Constant-Head inflow, m^3/s	1.10	1.50
Total inflow, m^3/s	**1.36**	**1.68**
Constant-Head outflow, m^3/s	-0.20	-0.18
Rivers baseflow, m^3/s	-0.97	-1.30
Evapotranspiration, m^3/s	-0.02	-0.02
Total outflow, m^3/s	**1.39**	**1.50**

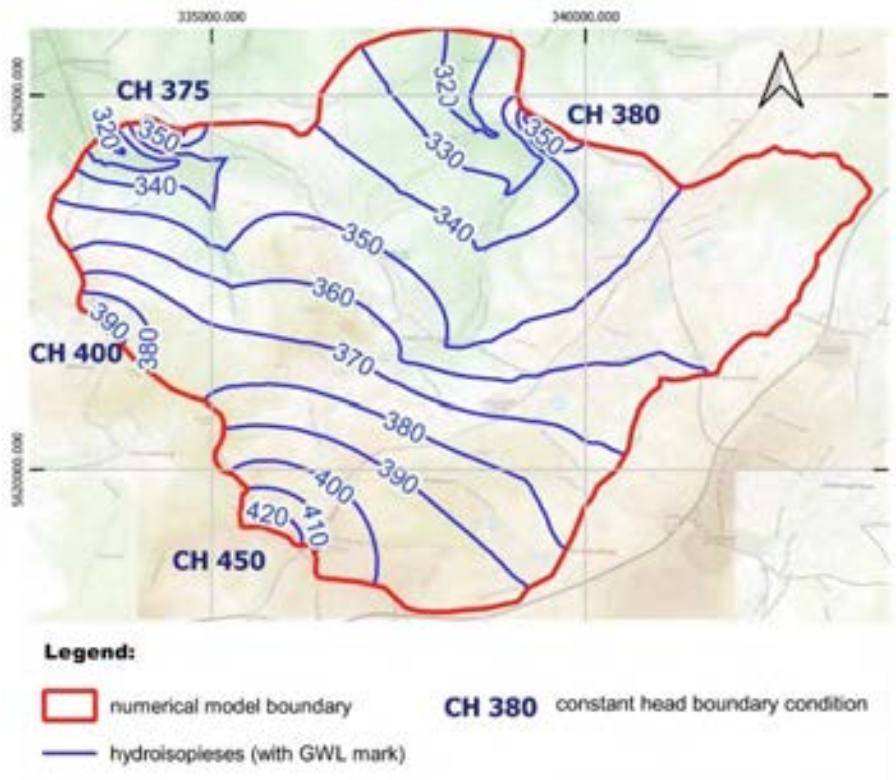


Fig. 7. Groundwater conceptual flow within the Lugau-Oelsnitz study area simulated in natural conditions

der of the model has been demonstrating the ongoing groundwater recovery.

Drains network design approach that might recreate the excavation period was also proposed as a tool for the numerical model of the Central Donbass specific coal mines area, which combines a group of mines – 'K. Marks', 'Krasny Profintern', 'Krasny Oktyabr', 'Yunkom' – characterised by the same flooding regime.

By adjusting the filtration parameters within a specified range, we achieved piezometric contours that most accurately reflected the actual flood levels recorded on the final date of existing observations – 1 August 2019. The most accurate with respect to the recorded data is the flood level distribution surface shown in Figure 8.

The time interval during which such a distribution of absolute flood level marks was achieved in the model is 520 days, whereas the actual time required to raise the level to the specified marks based on observation data is 450 days. This can be explained by the fact that the flooding pattern inferred from the measurement data in the shafts differs slightly from the flooding behavior of the array within the depression cone. Thus, the rise in the flooding level in the mine shaft apparently occurs much faster than at the edges of the depression cone [21]. This is confirmed by the modelling results, which indicate the influence of the aquifer's capacitive parameters on the nature of groundwater-level recovery during mine flooding.

4. Conclusion. The hydrogeological conditions differ at each study area: the carboniferous formation of productive coal layers of Lugau-Oelsnitz mining field is considered more as aquitard – the groundwater system consumes main groundwater inflow from the upper high permeable formation of the Rotliegend (Müsseln formation) that also plays an essential role in groundwater storage, while the Central Donbass hydrogeological conditions are marked with the outcropping of the carboniferous formation to the surface, which determines the predominance of the overall influence of groundwater recharge from precipitation. Nevertheless, the sensitivity test performed after the deterministic model of the Central Donbass coal-mines fields reconstruction, as well as calibrations performed on steady-state and transient stages of groundwater flow modelling for the totally numerical model built for the Lugau-Oelsnitz coal-mines area, demonstrate that the groundwater system and mine waters in most abandoned coal mines with a long mining history may be considered as a joint system during the groundwater table rebound after the mines closure. The connection can be observed between mines flooding and dynamic equilibrium with the local hydrogeological regime.

Based on the calibrations of numerical hydrogeological models for mining regions in Germany and Ukraine, which share similar characteristics in terms of coal mining features, long-term mine operation and similar post-operational conditions, it has

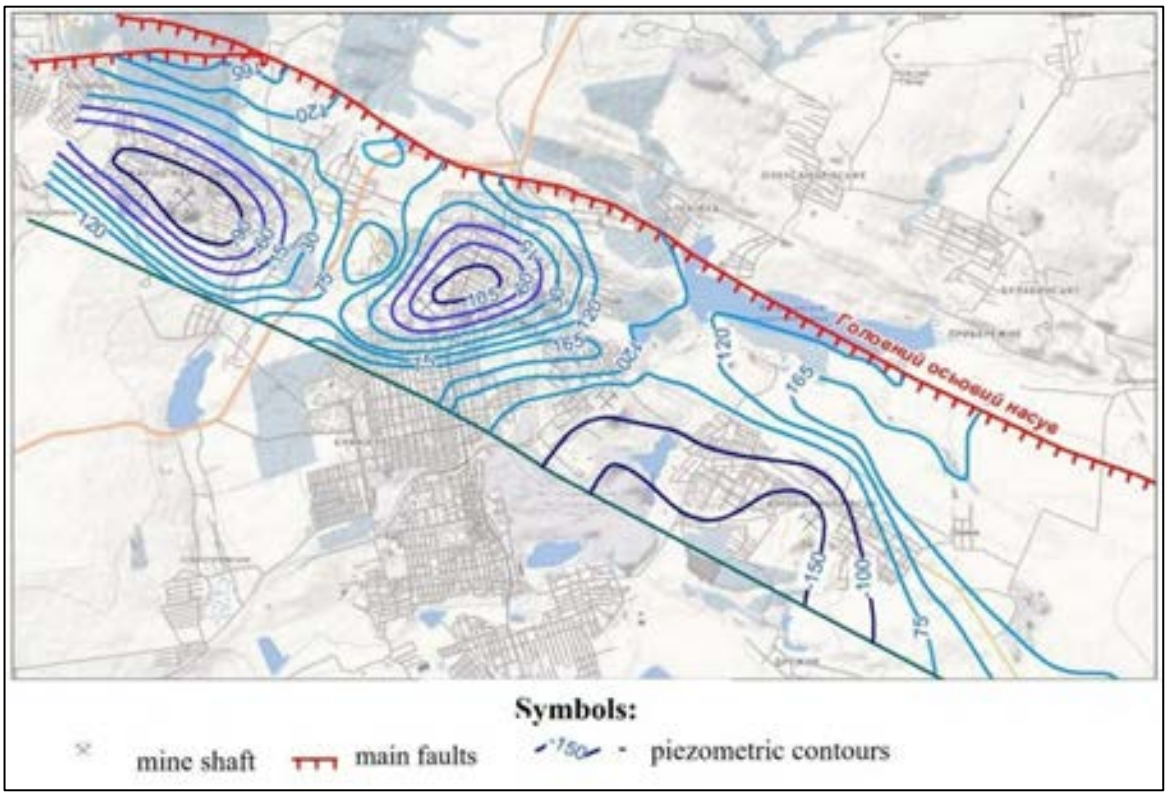


Fig. 8. Modelled piezometric contours obtained for the Central Donbass specific coal mines area

been established that the permeability and capacity parameters of the anthropogenically damaged rock mass within the interval of flooding levels differ significantly from natural ones, namely: the hydraulic conductivity and the specific yield can increase by an order of magnitude from that characteristic of the water-bearing strata, which is explained by the presence of technogenic fracturing of the bedrock.

Considering these conditions, the approach, which enables the reconstruction of the coal extraction period in mines (if the data has been lost due to the age of the mines themselves) by approximating the inflow value at the drainage node at each extraction interval, has proven itself to be quite effective in the process of numerical hydrogeological modelling of the disturbed geofiltration regime within mine fields.

Bibliography

1. *Gee, D., Bateson, L., Grebby, S., Novellino, A., Sowter, A., Wyatt, L. et al. (2020). Modelling groundwater rebound in recently abandoned coalfields using DInSAR. Remote Sensing of Environment, 249.* https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112021
2. *Younger, P. L. (2016). Abandoned coal mines: From environmental liabilities to low-carbon energy assets. International Journal of Coal Geology, 164, 1-2.* https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.08.006
3. *Boiko, K., Sadovenko, I., Ulytsky, O., Zahrytsenko, O. (2020). Risk assessment of radionuclide contamination spreading while flooding coal mined-out rocks. Mining of Mineral Deposits, 14(4), 130-136.* https://doi.org/10.33271/mining14.04.130
4. *Eckart, M, Klinger, C, Unland, W, Rengers, R, Metz, M, and Blachere, A. (2006). Prediction of the effects of flooding in the coal mining industry; Prognose der Flutungsauswirkungen im Steinkohlenbergbau. Germany.*
5. *Бойко, К. (2021). Особливості формування режиму підземних вод при затопленні шахт Торецько-Єнакієвської гірничо-промислової агломерації. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата геологічних наук, Київ.*
6. *Boiko, K. Ye., & Zagritsenko, A. M. (2022). Justification of a conceptual geofiltration model of a mine field for solving water regulation problems. Materials of the XII All-Ukrainian Scientific and Technical Conference of Postgraduate Students and Young Scientists "Scientific Spring", Section: Earth Sciences, NTU DP.* http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/161049
7. *Садовенко, І., Загриценко, А., Деревягіна, Н. (2022). Обґрунтування варіантів екологічного захисту шахтного поля в умовах відновлення рівнів підземних вод. Збірник наукових праць Національного гірничого університету, 62-06, 65-76.* https://doi.org/10.33271/crpnmu/62.065
8. *Рудаков, Д. В., Садовенко, І. О., Інкін, О. В., & Деревягіна, Н. І. (2022). Обґрунтування екобезпечного рівня води шахти №2 «Новогродівська» для захисту прилеглих територій від підтоплення. Збірник наукових праць Національного гірничого університету, Гірництво, 68, 58-66.* https://doi.org/10.33271/crpnmu/68.058
9. *Berger, S. (2007). Technology and the Culture of Modernity in Britain and Germany, 1890–1945. By Bernhard Rieger, Twentieth Century British History, 18 (2), 254–256,* https://doi.org/10.1093/tcbh/hwl030

10. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, & Felix, M. (2010). Geologie und Bergbaufolgen im Steinkohlerevier Lugau/Oelsnitz. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Geoprofil, 13.
11. Felix, M. (2007). Bergbaufolgen im ehemaligen Steinkohlenrevier Lugau/Oelsnitz unter besonderer Berücksichtigung des Grubenwasseranstiegs. Abschlussbericht, Archiv LfUG.
12. Veb Hydrogeologie (1977). Hydrogeologisches Übersichtsgutachten Kreis Zwickau-Land. Bericht, VEB Hydrogeologie Nordhausen, Freiberg.
13. González-Quirós, A., Fernández-Álvarez, J.P. (2019). Conceptualization and finite element groundwater flow modelling of a flooded underground mine reservoir in the Asturian Coal Basin. Journal of Hydrology, 578. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124036
14. Younger, P. L. (2004). Environmental impacts of coal mining and associated wastes: a geochemical perspective. Geological Society, London, Special Publications, 236 (1), 169–209.
15. Younger, P. L. (2016). A simple, low-cost approach to predicting the hydrogeological consequences of coalfield closure as a basis for best practice in long-term management. International Journal of Coal Geology, 164, 25-34. https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.06.002
16. Zhao, C., Jin, D., Geng, J. et al. (2019). Numerical Simulation of the Groundwater System for Mining Shallow Buried Coal Seams in the Ecologically Fragile Areas of Western China. Mine Water Environ 38, 158–165. https://doi.org/10.1007/s10230-018-0551-z
17. Улицький, О.А., Семенов, А.П., Грядущий, Ю.Б, Іванов, І.Е (2001). Оцінка ризику прориву води на прикладі бар'єрного цілика між шахтами «Донецька» та «Комсомолець Донбасу». Фізичні та технічні проблеми гірничої справи. Донецьк, 4, 83-90.
18. Усенко, В. В. (2001). Гідрогеологічне та інженерно-геологічне довивчення з геологічними та екологічними дослідженнями в масштабі 1:50 000 на території, що охоплюється листами М-37-112-А, Б, В. Артемівськ, Донецька ГРП.
19. Kolitsch, S. (2008). Hydrogeologische Analyse und großräumige Modellierung des weiteren Vorerzgebirgssenkenraumes, Univ. Freiberg (Sachsen), 387. https://doi.org/10.23689/fidgeo-181
20. Harms, S., Konietzky, H., Stoll, R. (2016). Current state of the mining-induced consequences at the coalfield Lugau/Oelsnitz. Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg zum 45. Geomechanik-Kolloquium, 291-302.
21. Улицький О. А., Єрмаков В. М., Бузило В. І., Павличенко А. В. (2014). Гідрогеологічні та геомеханічні чинники екологічної безпеки геологічного середовища в умовах виведення з експлуатації вугільних шахт. Монографія, ДВНЗ, 11.

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

References

1. Gee, D., Bateson, L., Grebby, S., Novellino, A., Sowter, A., Wyatt, L. et al. (2020). Modelling groundwater rebound in recently abandoned coalfields using DInSAR. Remote Sensing of Environment, 249. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112021
2. Younger, P. L. (2016). Abandoned coal mines: From environmental liabilities to low-carbon energy assets. International Journal of Coal Geology, 164, 1-2. https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.08.006
3. Boiko, K., Sadovenko, I., Ulytsky, O., Zahrytsenko, O. (2020). Risk assessment of radionuclide contamination spreading while flooding coal mined-out rocks. Mining of Mineral Deposits, 14(4), 130-136. https://doi.org/10.33271/mining14.04.130
4. Eckart, M, Klinger, C, Unland, W, Rengers, R, Metz, M, and Blachere, A. (2006). Prediction of the effects of flooding in the coal mining industry; Prognose der Flutungsauswirkungen im Steinkohlenbergbau. Germany.
5. Boiko, K. (2021). Features of groundwater dynamics establishment during mines flooding within Toretsk-Enakieve mining and industrial agglomeration. Thesis for the degree of Candidate of Sciences (CSc), Kyiv. [in Ukrainian]
6. Boiko, K. Ye., & Zagritsenko, A. M. (2022). Justification of a conceptual geofiltration model of a mine field for solving water regulation problems. Materials of the XII All-Ukrainian Scientific and Technical Conference of Postgraduate Students and Young Scientists "Scientific Spring", Section: Earth Sciences, NTU DP. http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/161049
7. Sadovenko, I., Zahrytsenko, A., Dereviahina, N. (2022). Justification of options of ecological protection of mine field areas in conditions of groundwater level recovery. The Collection of Research Papers of the National Mining University, 62-06, 65-76. https://doi.org/10.33271/crpnmu/62.065 [in Ukrainian]
8. Rudakov, D. V., Sadovenko, I. O., Inkin, O. V., & Derevyagina, N. I. (2022). Justification of environmentally safe water level in "Novohrodivska 2" mine for protecting adjacent areas from flooding. Collection of research papers of the National Mining University, Mining, 68, 58-66. https://doi.org/10.33271/crpnmu/68.058 [in Ukrainian]
9. Berger, S. (2007). Technology and the Culture of Modernity in Britain and Germany, 1890–1945. By Bernhard Rieger, Twentieth Century British History, 18 (2), 254–256, https://doi.org/10.1093/tcbh/hwl030
10. Saxon State Office for Environment, Agriculture and Geology, & Felix, M. (2010). Geology and mining consequences in the Lugau/Oelsnitz coal mining area. Saxon State Office for Environment, Agriculture and Geology, Geoprofil, 13. [in German]
11. Felix, M. (2007). Mining consequences in the former coal mining area of Lugau/Oelsnitz, with special consideration of the rise in mine water levels. Final report, LfUG archive. [in German]
12. Veb Hydrogeology (1977). Hydrogeological overview report for the district of Zwickau-Land. Report, VEB Hydrogeology Nordhausen, Freiberg. [in German]

13. González-Quirós, A., Fernández-Álvarez, J.P. (2019). Conceptualization and finite element groundwater flow modelling of a flooded underground mine reservoir in the Asturian Coal Basin. Journal of Hydrology, Vol. 578. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124036
14. Younger, P. L. (2004). Environmental impacts of coal mining and associated wastes: a geochemical perspective. Geological Society, London, Special Publications, 236 (1), 169–209.
15. Younger, P. L. (2016). A simple, low-cost approach to predicting the hydrogeological consequences of coalfield closure as a basis for best practice in long-term management. International Journal of Coal Geology, 164, 25-34. https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.06.002
16. Zhao, C., Jin, D., Geng, J. et al. (2019). Numerical Simulation of the Groundwater System for Mining Shallow Buried Coal Seams in the Ecologically Fragile Areas of Western China. Mine Water Environ 38, 158–165. https://doi.org/10.1007/s10230-018-0551-z
17. Ulitsky, O.A., Semenov, A.P., Gryadushchy, Yu.B., Ivanov, I.E. (2001). Assessment of the risk of water breakthrough using the example of the barrier wall between the Donetskaya and Komsomolets Donbassa mines. Physical and technical problems of mining. Donetsk, 4, 83-90. [in Ukrainian]
18. Usenko V. V. (2001). Hydrogeological and engineering-geological follow-up study with geological and ecological research on a scale of 1:50,000 in the area covered by sheets M-37-112-A, B, V. Artemivsk, Donetsk GEP. [in Ukrainian]
19. Kolitsch, S. (2008). Hydrogeological analysis and large-scale modelling of the wider Ore Mountains basin area., Univ. Freiberg (Sachsen), 387. https://doi.org/10.23689/fidgeo-181 . [in German]
20. Harms, S., Konietzky, H., Stoll, R. (2016). Current state of the mining-induced consequences at the coalfield Lugau/Oelsnitz. Publications by the Institute of Geotechnical Engineering at TU Bergakademie Freiberg on the 45th Geomechanics Colloquium, 291-302.
21. Ulytskyi, O. A., Yermakov, V. M., Buzylo, V. I., & Pavlichenko, A. V. (2014). Hydrogeological and geomechanical factors of environmental safety of the geological environment in the context of decommissioning coal mines. Monograph, DVNZ, 11. [in Ukrainian]

Моделювання рівня підземних вод у процесі виведення вугільних шахт із експлуатації

Катерина Бойко [1]
к. геол. н., ст. наук. співробітник,
[1] Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України», Київ, Україна;
Олег Улицький [1]
д. геол. н., в.о. зав. кафедри екологічної геології та термодинаміки геосфер;
Павло Бойко [1]
провідний інженер

Недіючі вугільні шахти, які були закриті шляхом затоплення (мокрої консервації), становлять небезпеку для навколишнього середовища, насамперед через ризик забруднення ґрунтових вод, просідання ґрунту та заболочування прилеглих територій. Оцінка ризику затоплення за допомогою чисельного гідрогеологічного моделювання для територій, на яких розташовані вугільні шахти, що побудовані на початку минулого століття, є складним завданням, оскільки інформація про експлуатаційні параметри не збереглася до наших днів або є обмеженою. Під час дослідження було вивчено потенціал чисельного моделювання динаміки підземних вод для прогнозування відновлення рівня підземних вод під час затоплення шахт та ступінь його точності. В якості пілотних досліджуваних територій були обрані ділянки видобутку у вугільному басейні Саксонії (Німеччина) та група шахт Центрального Донбасу (Україна). Обидва пілотні проекти характеризуються тим, що об'єднують понад 20 шахтних полів колишніх гідравлічно пов'язаних вугільних шахт з більш ніж 100-річною історією видобутку, та є подібними за схемами експлуатації. Програмні продукти, що були використані під час дослідження, містять тривимірний код кінцевих елементів, що використовується для обчислення характеру руху підземних вод. Крім того, були розроблені та впроваджені підходи калібрування у вигляді розрахункових рішень (таких як аналіз чутливості та багатовимірні моделювання на спрощеній блоковій моделі) для усунення невизначеностей гідрогеологічних параметрів та проблем недостатності історичних технічних даних, таких як швидкість відкачування, кількість горизонтів видобутку, особливості видобутку та контури гірничих виробок. Розроблена узагальгююча чисельна гідрогеологічна модель охоплює всі загальні етапи повного циклу чисельного моделювання геофільтрації, включаючи моделювання етапу неусталеної фільтрації, характерного саме для періоду експлуатації. Для цієї мети була розроблена спеціальна методологія, що включає цикл калібрувань усталеної та неусталеної фільтрації, а також калібрування прогнозних параметрів з метою досягнення найменших похибок моделювання між спостережувальними та модельованими рівнями підземних вод.

Ключові слова*: недіючі вугільні шахти, відновлення рівня підземних вод, чисельне моделювання геофільтрації підземних вод, концептуальна гідрогеологічна модель, гранична умова дрени, гідрогеологічні параметри.*

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу
Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 12 жовтня 2025 р.
Прийнята 17 листопада 2025 р.

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-03
УДК (551.242+551.247.1):551.78(477)

Надійшла 6 травня 2025 р.
Прийнята 30 липня 2025 р.

Присвячується світлій пам'яті
дослідників цієї території –
Ігоря Миколайовича Ремізова
та
Володимира Георгійовича Космачова

Структурні співвідношення кайнозойських складчастих деформацій та рухів солі Червонооскільського куполу

Сергій Горяйнов [1]
к. геол.-мін. н., доцент, кафедра фундаментальної та прикладної геології,
[1] Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна,
e-mail: gorjajnov@karazin.ua, Scopus ID 59495838600;
Світлана Кірічік [1]
ст. наук. співробітник, Музей природи,
e-mail: kirichiks@ukr.net, https://orcid.org/0009-0006-6993-628x;
Марія Космачова [1]
к. геогр. н., ст. наук. співробітник, Музей природи,
e-mail: mvkosmachova@karazin.ua, https://orcid.org/0000-0001-5642-8709;
Ірина Самчук [1]
к. геол. н., доцент кафедри фундаментальної та прикладної геології,
e-mail: samchuk@karazin.ua, https://orcid.org/0000-0002-8117-6117

Складчастість розвивається при колізійних епохах впродовж перших мільйонів років. Зростання соляних діапірів проходить впродовж десятків - сотень мільйонів років. Проблемою є встановлення структурних наслідків взаємодії цих різних тектонічних рухів. Складчастість і соляні діапіри проявлені на північно-західних окраїнах Донбасу, що відображено на детальних геологічних картах. В районі Червонооскільського куполу встановлені складчасті деформації ларамійського та аттичного віку, а також деформації від зростання соляного діапіру. Тому тут є можливість встановити структурні співвідношення результатів складчастих та солянокупольних рухів. Аналіз показав, що геологічний простір території поділений розривними порушеннями на тектонічні блоки. Об'єми блоків кутовими неузгодженнями розділені на структурні поверхи - кайнозойський, мезозойський та палеозойський. Тривимірні форми поверхонь кутових неузгоджень відображались ізолініями. Аналізувались форми складок різних структурних поверхів. Ларамійська складчастість території проявлена у післякрейдових – доеоценових розривних порушеннях, лінійних складках мезозою довжиною більше 100 км, кутовому неузгодженні в підошві кайнозою. Аттичні деформації проявлені у післяміоценових – допліоценових розривних порушеннях, розмиві еоцен-міоценових відкладів, у кутовому неузгодженні між міоценом та пліоценом. Ларамійські складки повторно дислоковані та розбиті на блоки аттичними насувами. У мезозойському структурному поверсі Червонооскільський соляний купол проявлений брахіантикліналлю, вигином вісей суміжних ларамійських складок, ундуляціями їхніх шарнірів, а також оточуючим прогином з амплітудою прогинання 300 м. В цьому компенсаційному прогині підошва кайнозою також занурена на 40 – 80 м і більше. Вісі прогинання у кайнозойському та мезозойському поверхах співпадають. Галокінетичні форми деформовані аттичними та ларамійськими насувами. Компенсаційне прогинання відображається у структурі мезозойського складчастого комплексу з більшою амплітудою, ніж у будові кайнозойського комплексу. Зростання амплітуди прогинання у мезозойських відкладах відносно кайнозойських свідчить про успадкований розвиток галокінезу впродовж кайнозою і про накопичення різновікових амплітуд прогинання.

Ключові слова*: ларамійська складчастість, аттична складчастість, Червонооскільський купол, галокінез, північно-західні окраїни Донбасу.*

Як цитувати: Горяйнов Сергій, Кірічік Світлана, Космачова Марія, Самчук Ірина (2025). Структурні співвідношення кайнозойських складчастих деформацій та рухів солі Червонооскільського куполу. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*, (63), 35-50. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-03

In cites: Goryainov Sergey, Kirichik Svitlana, Kosmachova Maria, Samchuk Iryna (2025). Structural relationships of Cenozoic folding deformations and salt movements of the Chervonooskil dome. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 35-50. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-03 [in Ukrainian]

Постановка загальної проблеми. Складчасті деформації регіонів розвиваються зазвичай впродовж відносно коротких (у геологічних масштабах часу) колізійних епох тривалістю у перші мільйони років. Це дозволяє виділити у тому чи іншому регіоні окремі фази складчастості, які потім можна корелювати між різними регіонами і навіть між материками, а також об'єднувати у складчасті епохи (герцинську, альпійську і т. ін.). Ці колізійні процеси відбуваються завдяки глобальним мантійним рухам і не мають джерел енергії у земній корі.

© Горяйнов Сергій, Кірічік Світлана, Космачова Марія, Самчук Ірина, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Паралельно з цим існують і тектонічні рухи, у котрих такі корові джерела енергії існують. Це перш за все рухи солянокупольної тектоніки. Вони вирівнюють гравітаційно неврівноважений стан між менш щільними та пластичними кам'яними солями та більш щільними силікатними породами, які їх перекривають. Зростання соляних діапірів проходить у середньому повільно і довготривало – впродовж десятків і навіть сотень мільйонів років.

Загальна проблема полягає у встановленні структурних наслідків взаємодії цих різних типів тектонічних рухів, що значно (у десятки – сотні разів) розрізняються за часом та інтенсивністю свого проявлення. Територія, на якій можна встановлювати такі структурні наслідки, повинна і бути складчастою, і водночас вміщувати соляні діапіри. Таким вимогам відповідає район Червонооскільського соляного штоку у басейні р. Сіверський Донець на північно-західних окраїнах Донбасу.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. Перші відомості про геологічну будову району відомі з кінця XVIII та початку XIX століття. З другої половини XIX ст. починається більш систематичне вивчення геологічної будови території у зв'язку з освоєнням вугільних ресурсів Донецького басейну [3].

В 1840–1841 рр. Б.К. Бльоде розробив першу стратиграфічну схему для околиць Донецького басейну. В 1856–1867 рр. М.Д. Борисяк, проводячи вивчення геологічної будови Ізюмського району, підтвердив здогадку про широкий розвиток тут палеозойських порід, які він розглядав як продовження донецьких кам'яновугільніх формацій. І.Ф. Леваковський (1862–1873 рр.) дав схему стратиграфічного розчленування донецької пермі, а також описав крейдові та третинні відклади лівобережжя р. Сіверський Донець. А.В. Гуров дав геологічний опис сучасних територій Харківської та Полтавської областей (1889 – 1893 рр.). Він розділив юрські відклади на два яруси, уточнив схему розчленування пермі, весь комплекс палеогенових відкладів від бучацької до харківської свит він відніс до еоцену, а полтавську – до неогену [17].

Дослідження північно-західного продовження Донецького кряжу, проведене А.Д. Архангельським, М.С. Шатським та ін. (1923), показало широкий розвиток "пізньокрейдових" (нині – ларамійських) деформацій території, що обумовили формування її складчастої структури. М.С. Шатський вперше (1924), на основі палеонтологічних даних, розділив верхньокрейдові відклади на яруси та уточнив склад палеогенових осадків [17].

У 1936 р. вийшла колективна монографія "Геологический очерк бассейна р. Донца" (під редакцією Д.М. Соболєва), присвячена проблемам водного будівництва та використання водних та мінеральних ресурсів території. В ній, мабуть, вперше для території показано наявність неотектонічних піднять земної кори, що відображається у геоморфологічних рисах її будови [17].

У 50-х – 60-х рр. XX ст. проведено геологічну зйомку міжріччя Сіверського Донця і Сухого Торця, що охоплює досліджувану територію (Ярченко, 1950; Курилюк, 1952; Слуцька, Воронов, 1953; Савинська, Бутенко, 1955; Роден, 1964; Закржевська, Купріянова, 1967; Камінський, 1967). Застосування структурно-картувального буріння дозволило отримати фактичні дані по утвореннях мезозою (від тріасу до верхньої крейди). Були складені геологічні карти докайнозойських відкладів, серія карт по мезозойських відкладах. Вивчений геологічний розріз до нижньої пермі включно. Виявлені Комишуваське, Берецьке, Співаківське, Новомечебилівське, Тернівське, Торсько-Дробишівське, Кам'янське, Святогірське, Червонооскільське підняття. Встановлені виходи тріасу під підошву кайнозою на Торсько-Дробишівській площі. Для Святогірської та Торсько-Дробишівської площ побудовані структурні карти по окремих горизонтах пермі.

Ці результати враховувались пізніше при проведенні детальних геологозйомочних робіт масштабу 1:50000 на цій території (Ляшенко, 1980; Жикаляк, 1984; Жикаляк, 1989). По результатах цих та більш детальних пошукових та геофізичних робіт проведено геологічне довивчення площ масштабу 1:200000 для складання геологічних карт нового покоління [14, 15], уточнені стратиграфічні схеми території [18].

Колективом авторів УкрНДІГазу у 2000 – 2018 рр. проведена робота по узагальненню, комп'ютерній обробці, аналізу, переінтерпретації численних матеріалів попередніх геологорозвідувальних робіт території, доповненню їх власними дослідженнями, зведенням всього цього фактичного матеріалу на електронну картографічну основу і оформлення за сучасними вимогами (Бережний, Горяйнов, Тердовідов, 2000; Бережний, Горяйнов, Лакоба, Тердовидов, 2002; Горяйнов, Бережний, Лакоба, Суярко, 2006; Горяйнов, Заріцький, Лакоба, 2011, 2014). Доповнення стосувались уточнення тектоніки території. Аналізувались риси геологічної будови, які не привернули уваги попередніх дослідників – насамперед простеження регіональних розривних порушень, виявлених у Донбасі, але не простежених в межах досліджуваної території. Також було проведено розділення розривних порушень за відносним віком з виділенням сіток

тектонітів, сформованих впродовж заальської, ларамійської та аттичної фаз складчастості. Основну увагу було приділено будові палеозойського комплексу, який був розкритий численними глибокими газопошуковими свердловинами вже після закінчення геологозйомочних робіт, і тому не врахованих попередниками [5–8]. Все це дозволило збільшити глибини геологічних побудов до 5–6 км [13].

Невирішена частина загальної проблеми. На північно-західному продовженні Донецького кряжу, у басейні Сіверського Донця встановлені регіональні складчасті деформації ларамійського (ранньокайнозойського) та аттичного (пізньокайнозойського) віку. Також там встановлені тектонічні деформації, що пов'язані з тривалим зростанням соляних діапірів впродовж палеозою, мезозою та кайнозою. Тому на даній території можна простежити структурні співвідношення результатів таких незалежних та різновікових тектонічних процесів.

Мета статті – встановлення структурних співвідношень результатів регіонально-складчастих та солянокупольних рухів на прикладі оточення Червоноосколького соляного куполу.

Метод дослідження – структурно-геологічний. В межах дослідження під *структурою* розуміються зв'язки та співвідношення між елементами будови об'єкту дослідження. Елементами геологічної будови території дослідження є:

- осадові свити кайнозою та їхні ерозійні рештки,
- тектоніти шумилівського (аттичного), сокольцовського (ларамійського), стильського (заальського) динамометаморфічних комплексів,
- тектонічно порушені свити мезозою,
- тектонічні блоки свит палеозою,
- соляні діапіри [1, 2, 10, 12, 13, 20, 21].

Структурні співвідношення між ними встановлювались прямими геологічними спостереженнями у природних відслоненнях і за результатами попередніх бурових робіт та допоміжних результатів геофізичних досліджень (гравірозвідки, магніторозвідки). Структурні побудови проводились поетапно.

На першому етапі будувались сітки розривних порушень в порядку від молодих (аттичних) до більш древніх заальських. Враховувалось, що більш древні сітки перетинаються більш молодими зі зміщеннями. Тривимірні форми розривних порушень відображались методом ізоліній глибини зміщувачів. В результаті геологічний простір території був поділений на тектонічні блоки.

На другому етапі проводився поділ об'ємів блоків, заповнених порушеними осадовими утвореннями, на структурні поверхи, які розділені кутовими неузгодженнями. За цією ознакою були виділені три складчасті поверхи (кайнозойський, мезозойський та палеозойський). Кайнозойський та мезозойський структурні поверхи розділяються підошвою палеогену [2]. Мезозойський та палеозойський структурні поверхи розділяються підошвою тріасу [1]. Форми поверхонь кутових неузгоджень будувались методом ізоліній в межах кожного блоку. Враховувалось, що більш древні сітки тектонітів перекриваються більш молодими відкладами з розмивом без зміщення.

На третьому етапі проводився аналіз складчастих деформацій в межах кожного тектонічного блоку методом аналізу форм опорних стратиграфічних поверхонь окремо для кожного структурного поверху. Тривимірні деформації опорних поверхонь відображались методом ізоліній. Аналізувались просторові орієнтації структурних елементів складок – розміри, амплітуди, нахил шарнірів, вигин осьових поверхонь тощо.

Основні результати дослідження. Територія досліджень перекрита майже суцільним малопотужним чохлом четвертинних та пліоценових континентальних осадових порід (лесові покриви, схилові утворення, алювіальні та пролювіальні відклади тощо). Чохол має горизонтально-шарувату структуру і утворює особливий, найбільш молодий структурний поверх території, який зараз знаходиться на стадії активного формування. На рис. 1 показано геологічну карту території, з якої цей пліоцен-четвертинний осадовий чохол *знятий*.

На карті видно, що під підошву горизонтально-шаруватого осадового чохлу виходять не тільки кайнозойські, а й мезозойські та палеозойські породи. Це – свідчення того, що під пліоценовою підошвою осадового чохлу існує кутове неузгодження післяміоценового – допліоценового віку. Воно сформовано у аттичну фазу складчастості альпійської тектонічної епохи. Авторські дослідження [20, 21] показали, що ця фаза складчастості сформувала окремий шумилівський комплекс тектонітів північно-східної вергентності, що охоплює майже всю Україну, в тому числі досліджувану територію.

На рис. 1–2 видно кутове неузгодження в підошві кайнозойських (еоцен-міоценових) відкладів. Підошва кайнозою накладається як на мезозойські, так і на палеозойські породи. Це – свідчення того, що під палеогеновою (еоценовою) підошвою осадового чохлу існує кутове неузгодження післямаастрихтського – доеоценового (палеоценового) віку. Воно сформовано у ларамійську фазу складчастості альпійської тектонічної епохи. Авторські дослідження [4, 20, 21] показали, що ця фаза складчастості сформувала

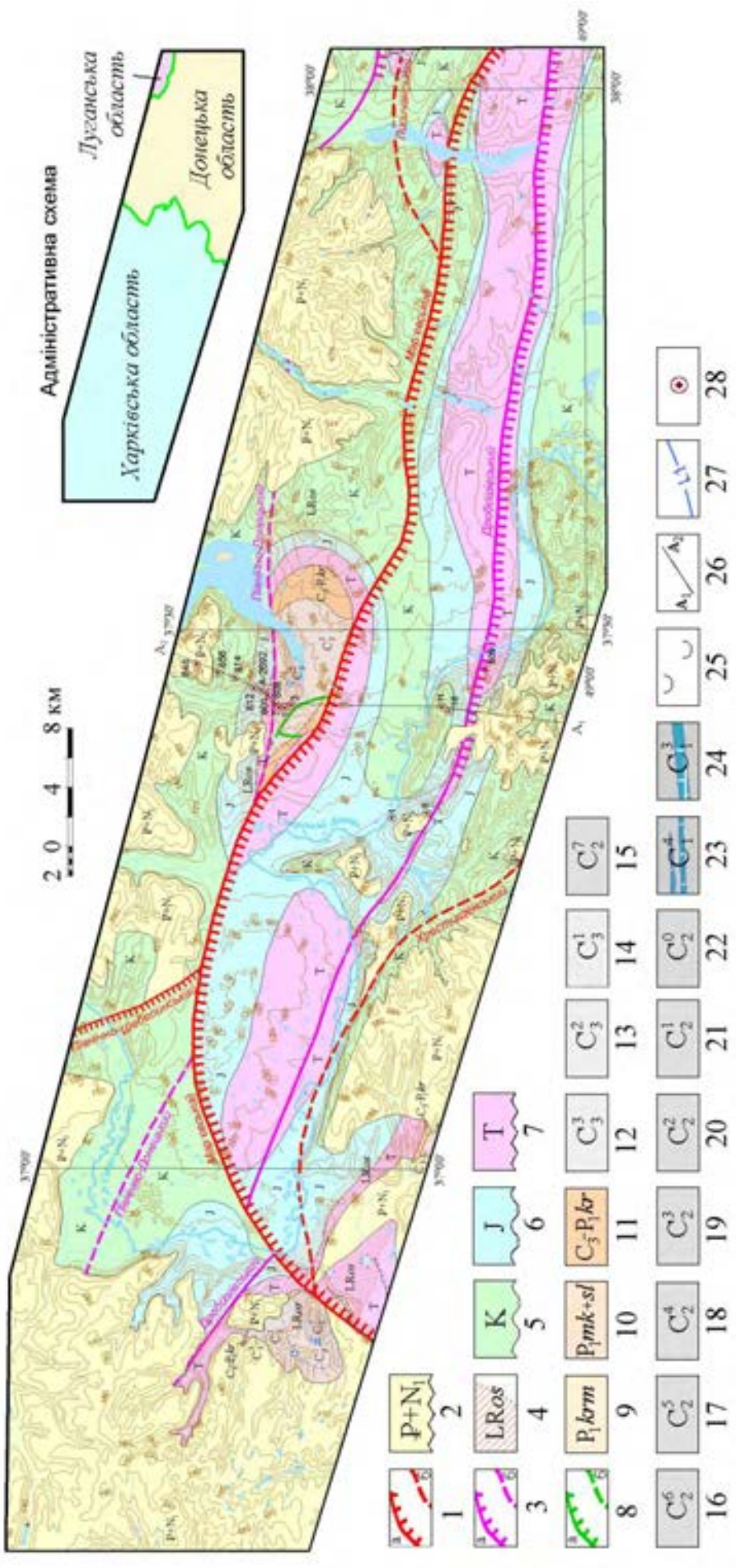


Рис. 1. Геологічна карта території досліджень / Fig. 1. Geological map of the research area

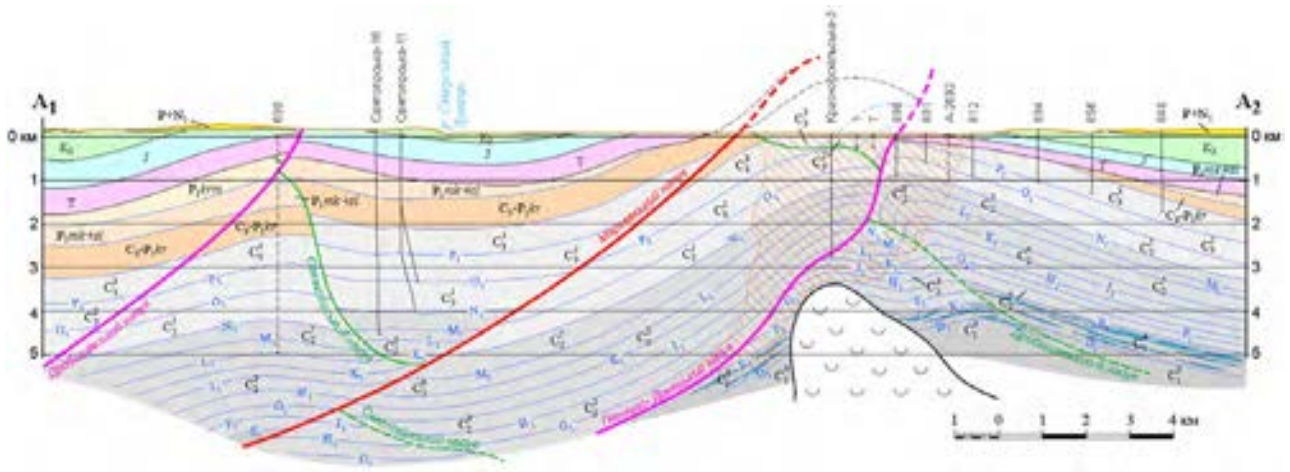


Рис. 2. Геологічний розріз за лінією $A_1 – A_2$ / Fig. 2. Geological section along the line $A_1 – A_2$.

Умовні позначення до рис. 1 та 2: 1 – аттичні насуви шумилівського комплексу (пліоцен) встановлені (а) та передбачувані (б); 2 – палеогенова система та міоцен об'єднані: кварцові піски, глини, подекуди мергелі сумарною товщиною 30 – 80 м; кутове неузгодження у підошві палеогену; 3 – ларамійські насуви соклольцовського комплексу (палеоцен) встановлені (а) та передбачувані (б); 4 – аргілізити, пропіліти остромогильського комплексу (палеоцен); 5 – крейдова система: крейда, мергелі, в основі – кварц-глауконітові пісковики; сумарна товщина до 750 м; стратиграфічне неузгодження у підошві крейди; 6 – юрська система товщиною 360 – 600 м: глини, піски, горизонти вапняків; стратиграфічне неузгодження у підошві юри; 7 – тріасова система товщиною 300 – 600 м: строкатокольорові пісковики та глини, горизонти гравелітів; кутове неузгодження у підошві трасу; 8 – герцинські насуви стильського комплексу (пізня перм – ранній тріас) встановлені (а) та передбачувані (б); 9 – 10 – пермська система (тільки на розрізі); 9 – краматорська свита товщиною до 300 м: кам'яна сіль, прошарки ангідритів та доломітів; 10 – микитівська та слов'янська свити об'єднані сумарною товщиною 260 – 630 м: гіпс-ангідритові породи, горизонти кам'яної солі, аргіліти, прошарки доломітів та вапняків; 11 – картамишська свита товщиною 650 – 750 м: строкатокольорові аргіліти, алевроліти, пісковики; 12 – 26 -кам'яновугільна система; 12 – 14 – верхньокам'яновугільний відділ; 12 – араукарітова свита товщиною 530 – 850 м: пісковики, аргіліти, алевроліти, прошарки мергелів; 13 – авилівська свита товщиною 640 – 850 м: пісковики, алевроліти, аргіліти, прошарки вапняків та вугілля; 14 – ісаєвська свита товщиною 580 – 740 м: аргіліти, алевроліти, вапняки з прошарками пісковиків та вугілля; 15 – 22 – середньокам'яновугільний відділ; 15 – горлівська свита товщиною 360 – 500 м: алевроліти, аргіліти, вапняки з горизонтами пісковиків та вугілля; 16 – 25 – підрозділи, показані тільки на геологічному розрізі; 16 – алмазна свита товщиною 250 – 300 м: алевроліти, аргіліти, вапняки з прошарками пісковиків та вугілля; 17 – каменська свита товщиною 320 – 350 м: пісковики, алевроліти, аргіліти з горизонтами вапняків та вугілля; 18 – білокалитвенська свита товщиною 230 – 250 м: аргіліти з прошарками пісковиків, алевролітів, вапняків; 19 – смолянинівська свита товщиною 480 – 550 м: пісковики, алевроліти, аргіліти з горизонтами вапняків та вугілля; 20 – моспинська свита товщиною 390 – 420 м: алевроліти, аргіліти з прошарками пісковиків, вапняків та вугілля; 21 – мандрикінська свита товщиною 240 – 260 м: алевроліти, аргіліти з прошарками вапняків; 22 – амвросієвська свита товщиною 330 м: аргіліти з прошарками алевролітів, пісковиків та вугілля; 23 – 26 – нижньокам'яновугільний відділ; 23 – кальміуська свита товщиною 450 м: аргіліти та вапняки з прошарками пісковиків; 24 – самарська сита товщиною 230 м: вапняки та аргіліти з прошарками алевролітів та вугілля; 25 – соляний діапір; 26 – геологічний розріз, показаний на рис. 2; 27 – горизонти маркуючих ("свитних") вапняків та їхні індекси; 28 – свердловини та їхні номери. На розрізі вертикальний та горизонтальний масштаби однакові. Чорною штриховою лінією показано повітряне продовження підошви тріасу.

Legend to Fig. 1 and 2: 1 – Attic thrusts of the Shumilivka complex (Pliocene) established (a) and predicted (b); 2 – Paleogene system and Miocene combined: quartz sands, clays, sometimes marls with a total thickness of 30–80 m; angular unconformity at the base of the Paleogene; 3 – Laramian thrusts of the Sokloltsovka complex (Paleogene) established (a) and predicted (b); 4 – argillizites, propylites of the Ostromogyl complex (Paleogene); 5 – Cretaceous system: chalk, marls, at the base – quartz-glauconite sandstones; total thickness up to 750 m; stratigraphic unconformity at the base of the Cretaceous; 6 – Jurassic system 360–600 m thick: clays, sands, limestone horizons; stratigraphic unconformity at the base of the Jurassic; 7 – Triassic system 300–600 m thick: variegated sandstones and clays, gravelite

horizons; angular unconformity at the base of the Tras; 8 – Hercynian thrusts of the Stylsky complex (Late Permian–Early Triassic) established (a) and predicted (b); 9 – 10 – Permian system (only in section); 9 – Kramatorsk formation up to 300 m thick: rock salt, layers of anhydrites and dolomites; 10 – Mykytivska and Slavyanska formations combined with a total thickness of 260 – 630 m: gypsum-anhydrite rocks, rock salt horizons, mudstones, layers of dolomites and limestones; 11 – Kartamysh formation 650 – 750 m thick: variegated mudstones, siltstones, sandstones; 12 – 26 - Carboniferous system; 12 – 14 – Upper Carboniferous series; 12 – Araucaritic formation 530 – 850 m thick: sandstones, mudstones, siltstones, layers of marls; 13 – Avilivska formation 640 – 850 m thick: sandstones, siltstones, mudstones, limestone layers and coal; 14 – Isaevska formation 580 – 740 m thick: mudstones, siltstones, limestones with sandstone layers and coal; 15 – 22 – Middle Carboniferous series; 15 – Gorlivska formation 360 – 500 m thick: siltstones, mudstones, limestones with sandstone horizons and coal; 16 – 25 – subdivisions shown only on the geological section; 16 – Almazna formation 250 – 300 m thick: siltstones, mudstones, limestones with sandstone layers and coal; 17 – Kamenska Formation, 320–350 m thick: sandstones, siltstones, mudstones with limestone and coal horizons; 18 – Belokalitvenska Formation, 230–250 m thick: mudstones with sandstone, siltstone, and limestone interlayers; 19 – Smolyaninivska Formation, 480–550 m thick: sandstones, siltstones, mudstones with limestone and coal horizons; 20 – Mospinska Formation, 390–420 m thick: siltstones, mudstones with sandstone, limestone, and coal interlayers; 21 – Mandrykinska Formation, 240–260 m thick: siltstones, mudstones with interlayers of limestone; 22 – Amvrosievska Formation, 330 m thick: mudstones with interlayers of siltstones, sandstones and coal; 23–26 – Lower Carboniferous series; 23 – Kalmius Formation, 450 m thick: mudstones and limestones with interlayers of sandstone; 24 – Samarskaya Formation, 230 m thick: limestones and mudstones with interlayers of siltstones and coal; 25 – salt diapir; 26 – geological section shown in Fig. 2; 27 – horizons of marking ("formation") limestones and their indices; 28 – wells and their numbers. In the section, the vertical and horizontal scales are the same. The black dashed line shows the aerial extension of the Triassic sole.

окремий сокольцовський комплекс тектонітів північно-західної вергентності, що охоплює майже всю Україну, в тому числі досліджувану територію. Ларамійська складчастість простежується по всій території позаальпійської Європи [22].

На рис. 1 – 2 також видно кутове неузгодження в підошві мезозойських (тріасових) відкладів. Підошва тріасу накладається на різні горизонти складчастого палеозою – на верхній карбон, різні свити пермі. Це свідчить про існування під підошвою тріасу кутового неузгодження післяпермського – дотріасового віку. Воно сформовано у заальську фазу складчастості герцинської тектонічної епохи. Авторські дослідження [5–8, 12, 21] показали, що ця фаза складчастості сформувала окремий стильський комплекс тектонітів південно-західної вергентності, що охоплює як мінімум Східну Україну, в тому числі досліджувану територію. Герцинська складчастість проявлена майже на усій території Євразії.

Таким чином, на території спостерігаються чотири структурних поверхи:

- нескладчастий пліоцен-четвертинний;
- одноразово складчастий еоцен-міоценовий (аттичний);
- дворазово складчастий мезозойський (ларамійський);
- тричі складчастий палеозойський (заальський).

Кожний структурний поверх (за виключенням пліоцен-четвертинного осадового чохлу), поруч з рештками свит та нестратифікованих утворень, включає у свій склад і комплекс новоутворених тектонітів, що обов'язково перетинає всі структурні поверхи, що мають більш древній геологічний вік. Геологічна будова цих структурних поверхів додатково ускладнена солянокупольними рухами. Опис структурних співвідношень складчастих поверхів та їхньої будови у межах території наведено нижче – від більш простих за геологічною структурою і відносно молодих до більш складних древніх [13].

Аттичний структурний поверх

Аттичний структурний поверх має складчасто-насувну структуру, обумовлену розвитком шумилівського дислокаційного комплексу північно-східної вергентності. Сукупність тектонітів аттичного віку та розділених ними блоків геоморфологічно виражена на Східній Україні як Донецький кряж та Приазовська височина у їхньому сучасному вигляді [9, 16]. Тектонічні рухи аттичного віку призвели до розділення всіх більш древніх утворень на лінзовидні у плані та розрізі блоки розміром у перші кілометри – десятки кілометрів (рис. 3), та до насування цих блоків один на одний у північно-східному напрямку [21].

Насуви аттичного віку. Поява власне тектонітів шумилівського комплексу пов'язана з міжблоковою деструкцією порід субстрату. Тектоніти утворюють неперервну сітку, окремі гілки або ланки якої є відомими насувами і носять власні назви. До аттичних насувів на території достовірно віднесені Мар'євський, Лисичанський, Північно-Шебелинський, Хрестищенський.

Мар'євський регіональний насув є крупнішим на території, простягається у північно-західному напрямку від границі з Росією до території досліджень більш ніж на 300 км. Істинна амплітуда його зміщення у Північному Донбасі (по вугленосним свитам московського ярусу

середнього карбону) оцінюється у 4,5 км при вертикальній складовій порядку 1,5 км та горизонтальному перекритті близько 3,5–4 км (рис. 2). На території Мар'євський насув подвоює розріз мезозою. На заході території, в районі вустя р. Береки, насув розгортається з північно-західного простягання на південно-західне, і через збереження вергентності трансформується у лівобічний підкидо-зсув. Вертикальна складова його зміщення зменшується, а горизонтальна – збільшується. В результаті вісь Берецького соляного куполу зміщена приблизно на 3–3,5 км на північний схід від вісі Петрівського куполу – його північно-західного продовження (рис. 1, 3).

Лисичанський насув відокремлюється від Мар'євського у його лежачому крилі на східному фланзі території. Він подвоює розріз мезозою, а східніше, в районі Лисичанська, подвоює розріз карбону і насуває його на кайнозойські відклади з істинною амплітудою 300–350 м [13].

Північно-Шебелинський насув – відгалуження Мар'євського насуву у північно-східному напрямку. Зустрінутий авторами на південному березі р. Сіверський Донець на західній околиці с. Червоний Донець за західною рамкою площі. Там насув розвинутий по мергелях еоцену і має північно-східну вергентність [13, 21]. Істинна амплітуда насування оцінюється у 100–150 м.

Хрестищенський насув виявлений біля с. Хрестище у кам'яному кар'єрі на Слов'янському піднятті за рамкою площі і має північно-східну вергентність [13]. На територію він простежений пошуковими свердловинами. В північно-західному напрямку змикається з Мар'євським насувом в районі вустя р. Берека. По зміщенню підошви кайнозою його амплітуда оцінюється у 30–50 м.

Деформації осадового кайнозойського чохлу. Амплітуда аттичних плікативних деформацій тектонічних блоків між насувами оцінювалась через аналіз дислокованості підошви кайнозою. Для цього в блоках були побудовані стратоізогіпси цієї підошви через 20 м по висоті там, де палеоген-міоценовий чохол присутній. Поля відсутності цих відкладів давали додаткову інформацію.

У висячому крилі Мар'євського насуву ерозійні рештки еоцен-міоценового чохлу локальні або відсутні у центрі та на сході території дослідження. Це пов'язано з тим, що вертикальна складова істинної амплітуди насуву у його фронтальній частині (приблизно 1–1,5 км) значно більша, ніж стратиграфічна товщина кайнозою (до 100 м). Тому цей осадовий чохол у висячому крилі насуву в його фронтальній частині на сьогоднішній день зародований. Розривні деформації підошви кайнозою далі на північ від Мар'євського, Північно-Шебелинського та Лисичанського насувів не спостерігаються (рис. 1, 3).

Прояви соляної тектоніки в межах аттичного поверху. Насування тектонічних блоків на північний схід повинно було б супроводжуватись зануренням та повним збереженням від ерозії еоцен-міоценового чохлу у *лежачому* крилі Мар'євського насуву та його відгалужень – Північно-Шебелинського та Лисичанського насувів. Але на ділянках, що примикають безпосередньо них, еоцен-міоценові відклади подекуди також відсутні. Ділянки відсутності кайнозою мають приблизно овальну форму розміром 8÷30 × 6÷12 км. При підході до них підошва кайнозою здіймається вгору на відмітки, що перевищують відмітки рельєфу. Таким чином, встановлюється наявність положистих піднять підошви кайнозою з амплітудою більше 80 м (рис. 3).

Зокрема, такі підняття відповідають Червонооскільському, Петрівському та Берецькому соляним штокам. Тому логічно пояснити їх появу післяміоценовою соляною тектонікою, що була активована завдяки аттичним насувним рухам. Сіль, за даними буріння та геофізичних досліджень, у вигляді штоків здіймається у даному регіоні з глибин 12–14 км, де залягають девонські соленосні горизонти.

Побудова ізоліній опорної поверхні дозволила виявити не тільки високоамплітудні піднятя опорної підошви кайнозою над соляними штоками, але й малоамплітудні підняття як у висячому, так і у лежачому крилі Мар'євського та інших насувів. Вони мають меншу вертикальну амплітуду (40–60 м) і, вірогідніше за все, відображають також рухи солі. Але проявлені вони не у вигляді штоків (для яких потрібні більші початкові запаси солі), а у вигляді "соляних подушок" з відносно невеликою амплітудою піднять [10].

Додатковим аргументом на користь соляно-тектонічної природи цих піднять є існування положистих компенсаційних прогинів, що дуговидно обмежують соляні підняття – як куполи та діапіри, так і "подушки". Їхня глибина на території досліджень складає 20–40 м та більше.

Такий компенсаційний прогин, відображений у підошві кайнозою, спостерігається і навкруги Червонооскільського соляного куполу. Зважаючи на те, що по південному крилу куполу проходить Мар'євський насув, збереженість цього прогину у його лежачому та висячому крилі різна (рис. 3).

У лежачому (північно-східному) крилі насуву компенсаційний прогин шириною 6–8 км дуговидно оминає Червонооскільський купол з півночі. Підошва кайнозою в донній частині прогину занурюється на відмітки нижче +100 м. З наближенням до Мар'євського насуву вісь на-

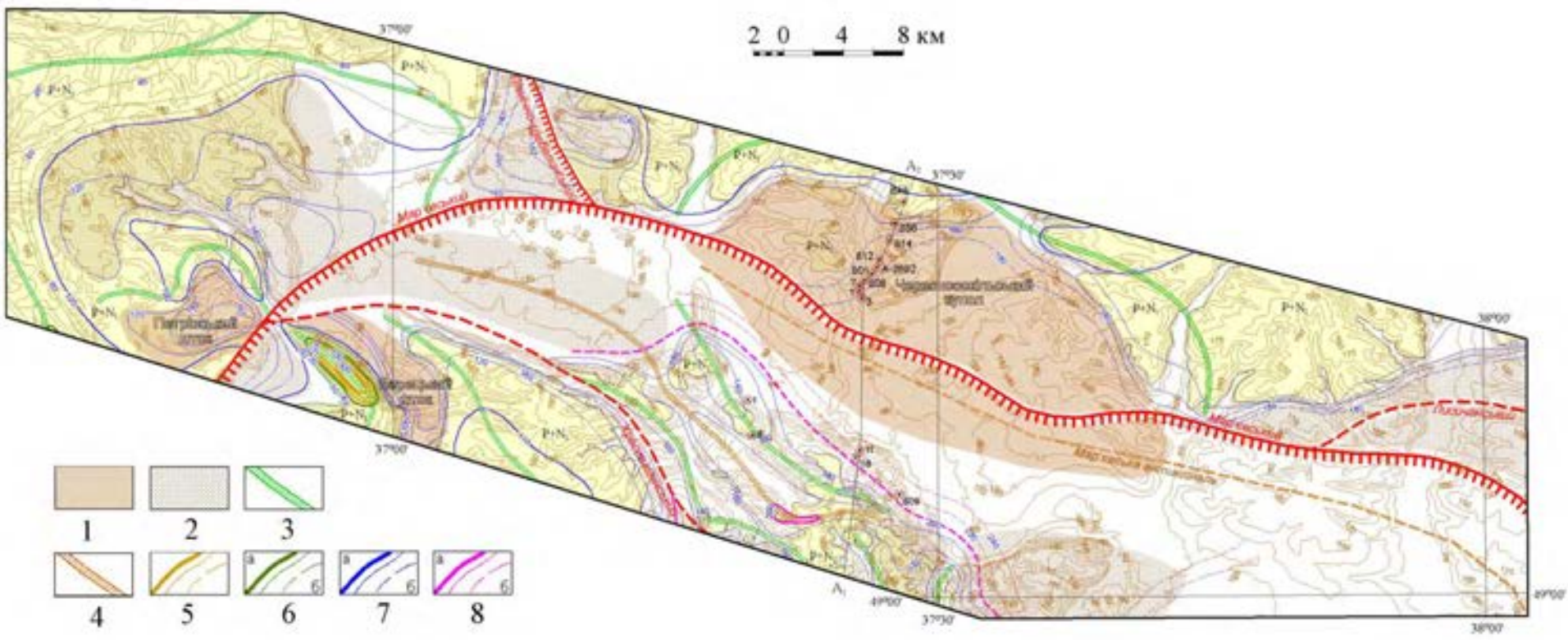


Рис. 3. Карта аттичного структурного поверху.

1 - підняття підошви кайнозою над відомими сольовими штоками; 2 - малоамплітудні підняття підошви кайнозою за межами сольових штоків (над "соляними подушками"); 3 - вісі компенсійних синкліналей навкруги сольових штоків; 4 - вісі тектоногенних антикліналей; 5 - стратоізогіпси підошви кайнозойського структурного поверху нижче 0 (рівня моря); 6 - те саме в інтервалі 0-99 м встановлені (а) та передбачувані (б); 7 - те саме в інтервалі 100-199 м встановлені (а) та передбачувані (б); 8 - те саме в інтервалі вище 200 м встановлені (а) та передбачувані (б).

Передбачуване розташування ізогіпси визначає мінімальну можливу відмітку /

Fig. 3. Map of the Attic structural floor.

1 - Cenozoic uplift of the sole above known salt stocks; 2 - low-amplitude Cenozoic uplift of the sole outside the salt stocks (above "salt pillows"); 3 - axes of compensatory synclines around salt stocks; 4 - axes of tectonogenic anticlines; 5 - stratoisogypsums of the sole of the Cenozoic structural floor below 0 (sea level); 6 - the same in the interval 0-99 m established (a) and predicted (b); 7 - the same in the interval 100-1 99 m established (a) and predicted (b); 8 - the same in the interval above 200 m established (a) and predicted (b). The predicted location of the isohypse determines the minimum possible mark

північльцевого прогину здіймається до відміток +140 – +160 м як західніше, так і східніше Червоноосківського куполу.

У висячому крилі Мар'євського насуву компенсаційний прогин майже повністю зародований. Лише на вододілах піднятого правого (південного) борту Сіверського Донця збереглися окремі ерозійні рештки кайнозойських відкладів його донної частини. Вони залягають на відмітках +140 – +160 м і вище і сумарно утворюють дуговидний фрагмент, оминаючий Червоноосківський купол з півдня (рис. 3). Північне крило цього компенсаційного прогину зародоване.

Відмічається здіймання вісей компенсаційних прогинів (як утворених навкруги соляних штоків, так і навкруги соляних подушок) з наближенням до Мар'євського та Хрестищенського насувів з їхніх висячих крил. Компенсаційні прогини, які утворились завдяки кайнозойським рухам соляних штоків та подушок, зазнали аттичних деформацій, як і увесь еоцен-міоценовий осадовий чохол.

Слід зазначити, що підйом соляних штоків на малі глибини може призвести і до протилежних локальних наслідків для кайнозойського чохлу – не утворення піднять, а, навпаки, формування западин внаслідок вилуговування солі. Так, наприклад, завдяки соляно-карстовим процесам над Берецьким соляним штоком на фоні загального підняття утворилась локальна западина з зануренням підошви кайнозою на глибину більше 400 м (рис. 3). Форма та розміри цієї западин приблизно відповідають розмірам штоку солі. Конседиментаційне збільшення товщин кайнозойських свит у межах западини вказує на розчинення солей під впливом підземних вод, паралельно з осадконакопиченням [13].

Ларамійський структурний поверх

В межах блоків аттичного віку під кайнозойськими відкладами встановлюється реліктова (на цей час) структура ларамійської складчастої області. Вона складається з великих тектонічних лусок, які розділяються зонами тектонітів сокольцовського динамометаморфічного комплексу. Тектонічні блоки перекриті підлогою кайнозою з розмивом та кутовим неузгодженням (рис. 1). Блоки, що розділені сокольцовськими тектонітами, мають лускувату форму в плані, їхні обмеження вигинаються на північ. Породи в межах блоків зім'яті у лінійні складки (рис. 4). Сітка тектонітів та обмежені нею тектонічні блоки на окремих ділянках заміщуються метасоматитами остромогильського комплексу, перетинаються та деформуються сіткою аттичних тектонітів шумилівського комплексу та додатково ускладнюються соляною тектонікою.

Насуви ларамійського віку. Міжблокова деструкція порід субстрату у післямаастріхтський – доеоценовий час призвела до появи тектонітів сокольцовського комплексу. Вони утворюють неперервну сітку, гілки якої є відомими насувами з власними назвами. До ларамійських на території досліджень віднесені Північно-Донецький та Дробишівський насуви, для яких встановлюється ларамійський вік по зміщенням мезозойських свит та по перекриттю підлогою кайнозою з кутовим неузгодженням без зміщень. Тектоніти характеризуються стійкою за площею північно-західною вергентністю [4, 9, 11, 16, 21]. За кінематикою ці насуви на території є правобічними підкидо-зсувами через співвідношення субширотного простягання та їхньої північно-західної вергентності.

Північно-Донецький насув проходить по території у її північній частині від східного флангу до західного. Східніше, в районі Лисичанська, він насуває карбон на крейду та тріас за даними вуглерозвідувальних робіт з істинною амплітудою більше 1,5 км (вертикальна складова амплітуди 800 – 1000 м). Насув обмежує з північного сходу Лисичанський вуглепромисловий район.

В центральній частині досліджуваної території Північно-Донецький насув проходить по північному флангу Червоноосківського куполу, де насуває карбон його ядра на мезозой (рис. 2, 4). Західніше насув перекривається лобовою частиною аттичного Мар'євського насуву і виходить з-під насувного козирка на північ від Петрівського куполу, де перекривається підошвою кайнозою.

Дробишівський насув відгалужується від Північно-Донецького у його висячому блоці в районі Лисичанська і простягається по досліджуваній площі майже паралельно Північно-Донецькому (рис. 4). На поверхні Дробишівський насув зафіксований у б. Протопівській поблизу с. Кам'янка південніше м. Ізюм, де утворює зону тектонітів північно-західної вергентності по глинах верхів тріасу. За структурними побудовами насув має амплітуду порядку 300 м [13].

Складки ларамійського віку. В тектонічних блоках, утворених сокольцовськими тектонітами, розміщується серія антиклінальних та синклінальних складок значної амплітуди (рис. 4).

Червоноосківський соляний купол в структурному плані підошви мезозою проявлений як брахіантикліналь розміром приблизно 34×15 км з північно-західним простяганням довгої вісі. Амплітуда антиклінального підняття значно перевищує 1,5 км (рис. 2). У ядрі антикліналі на поверхню виходять осадові породи верхнього карбону та пермі, крила складені породами мезозою. На глибині 3640 м розкрито кам'яну сіль

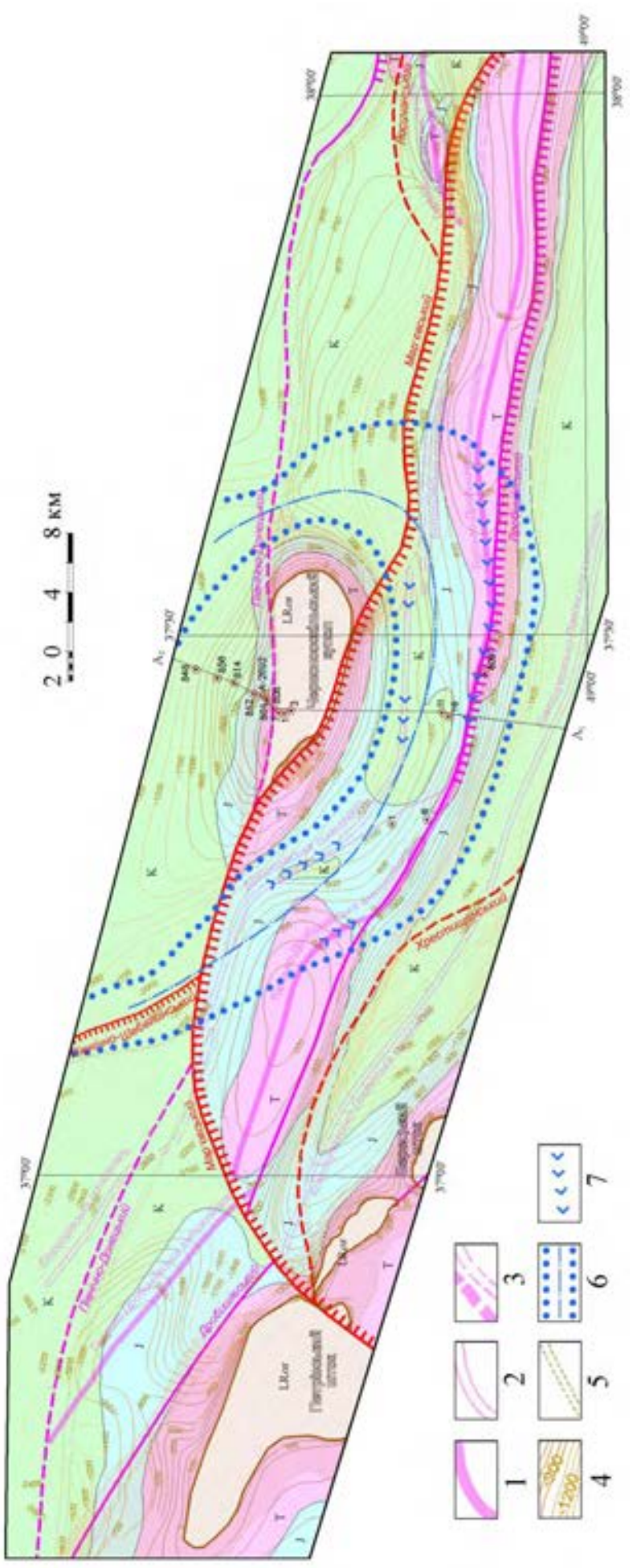


Рис. 4. Карта ларамійського структурного поверху.
1 - вісі антиклінералей ларамійського віку та їхні назви; 2 - вісі синклінералей ларамійського віку та їхні назви; 3 - продовження вісей складок під насувами;
4 - ізогіпси підошви мезозою; 5 - лінії перетину підошви мезозою з розривними порушеннями; 6 - контури та вісь компенсаційного прогину навкруги Червоноосківського куполу; 7 - нахил шарнірів складок /

Fig. 4. Map of the Laramian structural floor.
1 - axes of Laramian anticlines and their names; 2 - axes of Laramian synclines and their names; 3 - continuation of fold axes under thrusts; 4 - isogypsums of the Mesozoic sole;
5 - lines of intersection of the Mesozoic sole with discontinuous disturbances; 6 - contours and axis of the compensatory depression around the Chervonooskil dome;
7 - inclination of fold hinges

(св. 5-Р). Ядро складки Північно-Донецьким насувом насунуто на її північне крило (рис. 2). У ядерній частині складки вздовж насуву розвинуті аргілізити та пропіліти палеоценового остромогильського метасоматичного комплексу [13, 14] з розсіяною мінералізацією кіновари, піриту, галеніту, сфалериту, молібденіту (Жикаляк, 1984).

Вздовж південно-західного крила Червоноооскільського куполу проходить Мар'євський насув. Падіння зміщувача насуву і осадових тріасових порід крила майже паралельні, і тому насув на цій ділянці локально стає пошаровим.

Тернівська антикліналь знаходиться на східному фланзі території у лежачому крилі Мар'євського насуву та водночас – у висячому крилі Лисичанського насуву, який змикається з Мар'євським. Брахіантикліналь розміром 7,5×2,3 км має амплітуду до 500 м. Її довга вісь зорієнтована субширотно. В ядрі складки на поверхню виходять тріасові відклади, а крила складені юрською системою.

Білогорівська синкліналь простягається субширотно у висячому крилі Північно-Донецького насуву, має довжину більше 100 км при ширині до 6 км. Видима амплітуда складки (що залишилась після кайнозойської ерозії) перевищує 1 км. В ядрі складки залягають породи крейди, а крила складені юрськими породами (рис. 2, 4). Складка перетинається також Мар'євським насувом.

У висячому крилі Мар'євського насуву вісь синкліналі вигинається на південний захід, оминаючи південне крило Червоноооскільського куполу. На північний захід від куполу складка перетинається і Мар'євським, і Північно-Донецьким насувами. У лежачому крилі Північно-Донецького насуву шарнір складки здіймається у західному напрямку і складка замикається, утворюючи центрикліналь.

На південний схід від Червоноооскільського куполу вісь складки також зрізається Мар'євським насувом. Її продовження знаходиться вже під ним, і на поверхні східніше Червоноооскільського куполу спостерігається тільки її північне крило. Ядро Білогорівської синкліналі виходить на поверхню з-під Мар'євського насуву у східному напрямку вже за східною рамкою території, у Лисичанському районі. Там її шарнір здіймається вгору і складка також замикається.

Торсько-Дробишівська антикліналь простягається південніше Білогорівської синкліналі приблизно паралельно ній через всю площу більш ніж на 110 км при ширині до 6 км (рис. 4). Амплітуда складки сягає 1 км. За морфологією вона лінійна, з ундулюючим шарніром, і також розбивається на окремі блоки Мар'євським насувом. В ядрі складки спостерігаються відклади тріасу, а крила складені юрськими породами. Вздовж південного крила складки простягається Дробишівський насув.

На північному заході площі блок цієї складки занурений в лежачому крилі Мар'євського насуву (північніше Петрівського куполу). Тут у ядрі складки під підошву кайнозою виходять юрські породи. Західніше, між з'єднанням Північно-Донецького та Дробишівського насувів, складка замикається.

Східніше, у висячому крилі Мар'євського насуву, шарнір складки піднятий на 1,5 км і утворює ундуляційне підняття ("Співаківська брахіантикліналь") з тріасовими відкладами на виході ядра під четвертинні наноси.

В центральній частині території шарнір Торсько-Дробишівської антикліналі занурюється і вигинається на південь, оминаючи південне крило Червоноооскільського куполу, як і Білогорівська синкліналь. На цій ділянці в ядрі антиклінальної складки виходи тріасу на поверхню стають значно вужчими або повністю зникають під нижньоюрськими відкладами.

Східніше шарнір антикліналі йде паралельно Мар'євському насуву, поступово здіймаючись до східного перетинання з ним. В ядрі складки на поверхню виходять спочатку верхні, а потім нижні горизонти тріасу, а замок складки стає з циліндричного коробчастим. Складка перетинається Мар'євським насувом.

На поверхню з-під Мар'євського насуву ядро Торсько-Дробишівської антикліналі, складне тріасовими відкладами, виходить східніше, вже за східною рамкою території (у Лисичанському районі). Там її шарнір здіймається вгору і складка також замикається.

Комишувахсько-Лиманська синкліналь простягається паралельно Торсько-Дробишівській антикліналі приблизно на 130 км при ширині 5 – 12 км (рис. 4). Амплітуда складки становить до 2 – 2,5 км (рис. 2). У ядрі складки залягає крейдова система, а на крилах та центрикліналях – юрські відклади. По північному крилу складки проходить Дробишівський насув, який відділяє її від Торсько-Дробишівської антикліналі.

На західному фланзі території вісь складки перетинається майже перпендикулярно Мар'євським насувом. У лежачому крилі насуву шарнір складки занурений на 1,5 км і здіймається у західному напрямку. Складка замикається на північному крилі Петрівського куполу.

У висячому крилі Мар'євського насуву вісь складки зміщена на північний схід майже на 2 км відносно лежачого блоку, а з підходом до насуву шарнір складки здіймається. Далі на схід вісь складки також утворює положисту дугу з вигином на південь, як і Торсько-Дробишівська

та Білогорвіська складки. Шарнір складки зазнає ундуляцій з амплітудами 200 – 500 м, через що складка то звужується, то розширюється вздовж свого простягання.

Аттичні деформації ларамійських складок. Розміщення більшості лінійних ларамійських синкліналей та антикліналей у висячому крилі Мар'євського насуву обумовлює повторні аттичні деформації ларамійського складчастого ансамблю як цілого.

Мар'євський насув північно-західного простягання має у регіоні дуговидну форму. Тому на заході території та східніше її східного флангу він перетинає субширотні лінійні ларамійські складки (Білогорівську, Торсько-Дробишівську, Комишувахсько-Лиманську) під великими кутами. Він, згідно своєї північно-східної вергентності, зміщує вісі цих складок, які опинились у його висячому крилі, на північний схід на 2 – 3 км відносно їхнього продовження у лежачому крилі. При цьому в районі Петрівського куполу, на західному фланзі території (в районі устя р. Береки), зміщення є *лівобічно*-зсувними, а східніше території, у Лисичанському районі, зміщення є *правобічно*-зсувними.

Мар'євський насув під малим кутом перетинає вісь Білогорівської синкліналі на південному фланзі Червонооскільського куполу. Тому східніше вісь Білогорівської синкліналі по Мар'євському насуву перекрито її ж південним крилом.

У висячому крилі Мар'євського насуву самі складки зазнають накладених деформацій. З наближенням до Мар'євського насуву з боку його висячого крила шарніри і синклінальних, і антиклінальних складок здіймаються на сотні метрів, що добре відображають ізогіпси підошви мезозою (рис. 4). Крім того, система складок в цілому деформована насуванням висячого крила Мар'євського насуву. Так, донна частина Білогорівської синкліналі завдяки цьому насуванню знаходиться приблизно на 1 км вище, ніж донна частина паралельної Комишувахсько-Лиманської синкліналі, розташованої південніше (рис. 2).

Деформації ларамійського структурного поверху соляною тектонікою. На північно-західних окраїнах Донбасу, як вказувалось раніше, були виявлені численні солянокупольні структури [22]. Вони виявлялись саме по деформаціям мезозою території – по утворенню діапірових складок, ускладненню лінійних антикліналей ундуляціями тощо. Зокрема, на західному фланзі досліджуваній території Берецький та Петрівський соляні штоки помітно деформують прилягаючі крила Комишувахсько-Лиманської синкліналі та призводять до її замикання.

Дослідження також показали, що на території досліджень деформації мезозою неоднорідні [1, 9, 11, 16, 21]. На північ від Північно-Донецького ларамійського насуву деформації мезозою затухають. Це проявляється у зникненні кутового неузгодження між крейдою та палеогеном – там вони залягають паралельно. Це вказує на наявність північно-східної границі розвитку ларамійської складчастості у Східній Україні [11, 21].

Саме на Північно-Донецькому насуві розміщується Червонооскільський соляний купол. Він здіймає підошву мезозою більш ніж на 1,5 – 2 км, а у складчастій області вигинає к півдню вісі Білогорівської синкліналі та Торсько-Дробишівської антикліналі (у плані). По периметру купол оточується компенсаційними прогинами. У структурному плані мезозою вони порізному проявлені в межах ларамійських деформацій та поза ними.

У лежачому крилі Північно-Донецького насуву, на північ від Червонооскільського куполу, де ларамійські деформації затухають і майже відсутні, компенсаційний прогин проявлений у кільцевому зниженні підошви мезозою до відміток -1400 – -1500 м (рис. 4). Враховуючи, що північніше підошва мезозою піднімається до відміток –1100 м і вище та вирівнюється, амплітуду прогинання можна оцінити мінімум у 300 м.

У висячому крилі Північно-Донецького насуву ларамійські деформації проявлені лінійними складками. Тому структурний план підошви мезозою вже не може напряму відповідати навколокупольному компенсійному прогинанню – треба використовувати інші ознаки. Такими ознаками виступають шарніри Білогорівської синкліналі та Торсько-Дробишівської антикліналі. Потрапляння лінійних складок у зону витоку солі у шток (в зону оконтурюючого шток компенсаційного прогину) призводить до знижуючої ундуляції як Білогорівської синкліналі, так і Торсько-Дробишівської антикліналі.

Білогорівська синкліналь в оточенні південно-західного флангу Червонооскільського куполу знижує шарнір з відміток -800 – -900 м до глибин -1100 – -1200 м. Так само Торсько-Дробишівська антикліналь на тому ж фланзі знижує свій шарнір з відміток -300 – -400 м до глибин -600 – -700 м (рис. 4). Таким чином, за ундуляціями шарнірів лінійних складок амплітуда компенсаційного прогинання на південно-західному фланзі Червонооскільського куполу складає також величину порядку 300 м.

Наукова новизна дослідження полягає у тому, що на кількісній структурно-геологічній основі на прикладі Червонооскільського куполу показано ускладнення перехресно-насувної складчастої структури північно-західних околиць Донбасу галокінетичними рухами – не

тільки підйомом соляних штоків та діапірів, але й формуванням компенсаційних прогинів. Ці рухи розвиваються довгостроково та успадковано як мінімум на протязі всього кайнозою, порізному проявляючись на різних структурних поверхах.

Висновки. 1. Територія зазнала ларамійських деформацій, що проявлено у післякрейдових – доеоценових розривних порушеннях північно-західної вергентності та значної амплітуди (сотні – тисячі метрів), а також у формуванні серії лінійних складок довжиною більше 100 км з амплітудою у перші кілометри. Результатом стало регіональне кутове неузгодження між крейдою та палеогеном.

2. Ларамійська складчастість не врахована у тектонічному районування України [19], незважаючи на те, що вона відома тут вже більше 100 років [17].

3. Будова еоцен-міоценових відкладів вказує на те, що територія зазнала також післяміоценових деформацій. Сформувалась мережа розривних порушенн північно-східної вергентності та значної амплітуди (десятки – сотні метрів і більше). Це призвело до відсутності еоцен-міоценових відкладів на більшій частині досліджуваної території та у Донбасі в цілому. Складки ларамійського віку повторно дислоковані та розбиті на окремі блоки. Результатом стало регіональне кутове неузгодження між міоценом та пліоценом.

4. Складчасто-насувна структура території відповідає загальноєвропейській закономірності у перпендикулярній зміні вергентностей кайнозойських рухів впродовж кайнозою. Ранньокайнозойські (палеоценові) рухи мали північно-західну вергентність, що відповідало закриттю палеоокенау Тетіс. Пізньокайнозойські (міоцен-пліоценові) рухи мають північно-східну вергентність, що відповідає розкриттю Атлантики, яке триває і донині.

5. Складчасто-насувна структура території зазнала численних галокінетичних деформацій, що сформувало низку соляних куполів та соляних подушок. Зокрема, куполи ускладнюють складчасту будову ларамійського структурного поверху території, викликаючи брахіантиклінальні ундуляції лінійних ларамійських складок.

6. Червонооскільський соляний купол знаходиться в районі північної границі розповсюдження ларамійських деформацій.

7. Формування Червонооскільського соляного куполу супроводжується не тільки брахіантиклінальним підняттям, але й вигином вісей ларамійських складок на південь (у плані), а також компенсаційним оточуючим кільцевим прогином.

8. У мезозойському структурному поверсі прогин проявляється зниженням підошви мезозою (як у складчастому, так і у нескладчастому заляганні) приблизно на 300 м. У складчастому заляганні це зниження встановлюється по зануренню шарнірів складок (як синкліналі, так і антикліналі).

9. Проявлений у мезозойському структурному поверсі компенсаційний прогин перетинається ларамійським Північно-Донецьким насувом, але перекривається еоценовими відкладами з кутовим неузгодженням. Це свідчить про післяларамійський – доеоценовий вік формування цього прогину, майже синхронний складчастим деформаціям.

10. У кайнозойському структурному поверсі компенсаційний оточуючий кільцевий прогин проявляється зануренням підошви кайнозою на 40–80 м і більше відносно суміжних ділянок. При цьому вісі прогинання у кайнозойському та мезозойському структурних поверхах співпадають.

11. Галокінетичні форми території деформовані аттичними насувами, що вказує на початок їхнього формування на доаттичному етапі розвитку території.

12. Зростання амплітуди прогинання у мезозойських відкладах відносно кайнозойських свідчить про успадкований розвиток галокінезу впродовж кайнозою і накопичення різновікових амплітуд прогинання.

Список використаних джерел

1. *Геологічна карта докайнозойських утворень України (масштаб 1:1000000) (В. І. Калінін, ред.). (2007). Держ. геол. служба України.*
2. *Геологічна карта України (масштаб 1:1000000) (В. Я. Веліканов, ред.). (2007). Держ. геол. служба України.*
3. *Геология месторождений угля и горючих сланцев СССР (И. А. Кузнецов, ред.). (1963). Госгеолтехиздат.*
4. *Горяйнов, С. В. (2004). О ларамийском усложнении геологических структур Украины. Доповіді НАНУ, (12), 114–121.*
5. *Горяйнов, С. В. (2002). Тектонические особенности зоны сочленения Донбасса и Воронежского кристаллического массива. Питання розвитку газової промисловості України, 143–147.*
6. *Горяйнов, С. В. (2014). Про будову розрізу палеозою Сентянівської ділянки за результатами буріння глибокої свердловини Сентянівська-10. Питання розвитку газової промисловості України, 42(1), 7–14.*
7. *Горяйнов, С. В. (2014). Простеження Нового насуву параметричною свердловиною Тернівська-677. Питання розвитку газової промисловості України, 42(1), 14–17.*

8. Горяйнов, С. В. (2014). Нові результати дослідження глибоким бурінням геологічної будови палеозойського структурного поверху Північного Донбасу. Питання розвитку газової промисловості України, 42(1), 17–21.
9. Горяйнов, С. В. (2018). О положении Черноморского региона в общей схеме кайнозойских тектонических движений Восточной Европы и Ближнего Востока. Вісник Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна. Серія: Геологія, географія, екологія, (48), 52–62. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2018-48-04
10. Горяйнов, С. В. (2022). Альпійські тектонічні рухи і соляна тектоніка Східної України. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (56), 67–75. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-56-04
11. Горяйнов, С. В. (2023). Тектонічна природа Українського щита. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (59), 38–48. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-02
12. Горяйнов, С. В., & Коренєв, В. В. (2007). Перекрестно-надвиговая структура зоны сочленения Донбасса с Приазовским блоком Украинского щита. У Геологія та питання геологічного картування і вивчення докембрійських утворень Українського щита (Матеріали IV науково-виробничої наради геологів-зйомщиків України, pp. 102–104). Дніпропетровськ.
13. Горяйнов, С. В., & Скляренко, Ю. О. (2017). Прогноз локалізації та газоносності літологічних пасток південного сходу ДДЗ в межах ліцензійних ділянок ГПУ Шебелинкагазвидобування. Частина 1. Створення структурно-геологічної основи. УкрНДІГаз.
14. Державна геологічна карта України (масштаб 1:200000; аркуш M-37-XXVI «Слов'янськ») (О. П. Бондар та ін.). (1993). Артемівська ГРЕ.
15. Державна геологічна карта України (масштаб 1:200000; аркуш M-37-XXV «Лозова») (Л. П. Проць та ін.). (2006). ДРГП «Донецькгеологія».
16. Ковалев, А. А., & Горяйнов, С. В. (2019). Особенности кайнозойской тектоники Восточной Европы и Ближнего Востока.
17. Космачев, В. Г., & Космачева, М. В. (1993). Геологическая база «Каменка». ХГУ.
18. Стратиграфія верхнього протерозою, палеозою та мезозою України (П. Ф. Гожик, ред.) (2013). ІГН НАН України; Логос.
19. Тектонічна карта України (масштаб 1:1000000) (С. С. Круглов & Д. С. Гурський, ред.) (2007). Держ. геол. служба України.
20. Goryainov, S. (2021). Metamorphic and metasomatic complexes of the Middle Pobuzhye. ScienciaScripts.
21. Goryainov, S. (2021). Metamorphic and metasomatic complexes of the Ukrainian shield. ScienciaScripts.
22. Gaerther, H.-R., & Walter, H. W. (1971). International geological map of Europe and Mediterranean region (масштаб 1:5000000). International Geological Congress; Bundesanstalt fur Bondeforschung; UNESCO.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу
Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Structural relationships of Cenozoic folding deformations and salt movements of the Chervonooskil dome

Sergey Goryainov [1]
PhD (Geology and Mineralogy), Associate Professor,
Department of Fundamental and Applied Geology,
[1] V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine;
Svitlana Kirichik [1]
Senior Researcher, Museum of Nature;
Maria Kosmachova [1]
PhD (Geography), Senior Researcher, Museum of Nature;
Iryna Samchuk [1]
PhD (Geology), Associate Professor of the Department of Fundamental and Applied Geology

ABSTRACT

Statement of the general problem. Folding develops during collisional epochs lasting in the first millions of years. The growth of salt diapirs takes place over tens to hundreds of millions of years. The problem is to establish the structural consequences of the interaction of these different tectonic movements.

Analysis of previous studies and publications. Folding and salt diapirs are manifested on the northwestern outskirts of Donbass. Detailed geological maps have been compiled for the territory, faults have been established and traced, and tectonites of the Saalian, Laramian, and Attic phases of folding have been identified.

Unsolved part of the general problem. In the area of the Chervonooskil dome, folded deformations of Laramian and Attic age, as well as deformations from the growth of a salt diapir, have been established. The structural relationships between these different tectonic processes are unresolved.

The purpose of the article is to establish the structural results of folded and salt dome movements in the vicinity of the Chervonooskil dome.

The research method is structural geology. The geological space is divided into tectonic blocks. The volumes of the blocks are divided into structural floors by angular unconformities. The three-dimensional shapes of the surfaces of angular unconformities are depicted by isolines. The shapes of the folds of different structural floors were analyzed.

Main results of the study. Laramie folding of the territory is manifested in post-Cretaceous - pre-Eocene discontinuous disturbances, linear folds with a length of more than 100 km, angular unconformity in the sole of the Cenozoic structural floor. Attic deformations are manifested in post-Miocene - pre-Pliocene discontinuous disturbances, erosion of Eocene-Miocene deposits, in the angular unconformity between the Miocene and Pliocene. Laramie folds are secondarily dislocated and broken into blocks.

In the Mesozoic structural floor, the Chervonooskil salt dome is manifested by a brachianticline, a bend of the axes of adjacent Laramie folds, as well as a compensatory surrounding depression with an amplitude of 300 m. The sole of the Cenozoic in the compensatory depression is dipped by 40 - 80 m. The axes of subsidence in the Cenozoic and Mesozoic floors coincide. Halokinetic forms are deformed by Attic and Laramian thrusts.

Scientific novelty. On the basis of quantitative structural data for the Chervonooskil dome, it is shown that the cross-thrust folded structure of the northwestern outskirts of Donbass is complicated not only by the rise of the salt stock, but also by the formation of compensatory depressions. Compensatory depression is reflected in the structure of the Laramie folded complex with a larger amplitude than in the structure of the Attic complex.

Conclusions. The increase in the amplitude of depression in Mesozoic sediments relative to Cenozoic sediments indicates the inherited development of halokinesis throughout the Cenozoic and the accumulation of amplitudes of depression of different ages.

***Keywords**: Laramian folding, Attic folding, Chervonooskil dome, halokinesis, northwestern outskirts of Donbass.*

References

1. *Geological map of pre-Cenozoic formations of Ukraine (Scale 1:1000000) (V. I. Kalinin, Ed.). (2007). State Geological Service of Ukraine. [in Ukrainian]*
2. *Geological map of Ukraine (Scale 1:1000000) (V. Ya. Velikanov, Ed.). (2007). State Geological Service of Ukraine. [in Ukrainian]*
3. *Geology of coal deposits and oil shale of the USSR (I. A. Kuznetsov, Ed.). (1963). Gosgeoltekhizdat.*
4. *Goryainov, S. V. (2004). On the Laramie complex of geological structures of Ukraine. Reports of the National Academy of Sciences, (12), 114–121.*
5. *Goryainov, S. V. (2002). Tectonic features of the junction zone of the Donbass and the Voronezh crystalline massif. Issues of development of the gas industry of Ukraine, 143–147.*
6. *Goryainov, S. V. (2014). On the structure of the Paleozoic section of the Sentyanivska area according to the results of drilling a deep well Sentyanivska-10. Issues of development of the gas industry of Ukraine, 42(1), 7–14. [in Ukrainian]*
7. *Goryainov, S. V. (2014). Tracing the New Thrust by the parametric well Ternivska-677. Issues of development of the gas industry of Ukraine, 42(1), 14–17. [in Ukrainian]*
8. *Goryainov, S. V. (2014). New results of deep drilling studies of the geological structure of the Paleozoic structural floor of the Northern Donbass. Issues of development of the gas industry of Ukraine, 42(1), 17–21. [in Ukrainian]*
9. *Goryainov, S. V. (2018). On the position of the Black Sea region in the general scheme of the Cenozoic tectonic movements of Eastern Europe and the Middle East. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology", (48), 52–62. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2018-48-04*
10. *Goryainov, S. V. (2022). Alpine tectonic movements and salt tectonics of Eastern Ukraine. Bulletin of the V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology", (56), 67–75. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-56-04 [in Ukrainian]*
11. *Goryainov, S. V. (2023). Tectonic nature of the Ukrainian shield. Bulletin of the V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology", (59), 38–48. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-02 [in Ukrainian]*
12. *Goryainov, S. V., & Korenev, V. V. (2007). Cross-thrust structure of the junction zone of the Donbass with the Azov block of the Ukrainian shield. In Geology and issues of geological mapping and study of Precambrian formations of the Ukrainian shield (Proceedings of the 4th Scientific and Industrial Meeting of Geologists-Surveyors of Ukraine, pp. 102–104).*
13. *Goryainov, S. V., & Sklyarenko, Y. O. (2017). Forecast of localization and gas content of lithological traps of the south-east of the DDZ within the licensed areas of the GPU Shebelinkagazvydobuvannya. Part 1. Creation of a structural and geological basis. UkrNDIGaz. [in Ukrainian]*

14. *State geological map of Ukraine (Scale 1:200000; Sheet M-37-XXVI "Slovyansk"). (1993). Artemivska GRE. [in Ukrainian]*
15. *State geological map of Ukraine (Scale 1:200000; Sheet M-37-XXV "Lozova"). (2006). Donetskgeologia. [in Ukrainian]*
16. *Kovalev, A. A., & Goryainov, S. V. (2019). Features of the Cenozoic tectonics of Eastern Europe and the Middle East. State University Publishing House.*
17. *Kosmachev, V. G., & Kosmacheva, M. V. (1993). Geological base "Kamenka". KhNU.*
18. *Stratigraphy of the Upper Proterozoic, Paleozoic and Mesozoic of Ukraine. (2013). IGN NAS of Ukraine; Logos. [in Ukrainian]*
19. *Tectonic map of Ukraine (Scale 1:1000000). (2007). Government Geological Service of Ukraine. [in Ukrainian]*
20. *Goryainov, S. (2021). Metamorphic and metasomatic complexes of the Middle Pobuzhye. ScienciaScripts.*
21. *Goryainov, S. (2021). Metamorphic and metasomatic complexes of the Ukrainian shield. ScienciaScripts.*
22. *Gaerther, H.-R., & Walter, H. W. (1971). International geological map of Europe and Mediterranean region (Scale 1:5000000). International Geological Congress; Bundesanstalt für Bodenforschung; UNESCO.*

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 6 May 2025
Accepted 30 July 2025

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-04
УДК 551.763:551.351.2(262.5-16)

Надійшла 4 серпня 2025 р.
Прийнята 21 вересня 2025 р.

До питання про місцеві стратиграфічні підрозділи крейдових відкладів українського сектора північно-західного шельфу Чорного моря. Стаття 2. Верхня крейда

Ігор Іщенко [1]
д. геол. н., головний фахівець відділу регіональних геологічних досліджень,
[1] Київське відділення Українського науково-дослідного інституту природних газів, Київ, Україна,
e-mail: ihor.ishchenko@ugv.com.ua, http://orcid.org/0009-0002-3174-7978;
Леонід Якушин [2]
д. геол. н., доцент, ст. наук. співробітник відділу стратиграфії і палеонтології мезозойських відкладів,
[2] Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна,
e-mail: yakushin@ukr.net, http://orcid.org/0000-0002-0963-2026

Відклади верхнього відділу крейдової системи встановлено у розрізах 35 свердловин, що знаходяться на північно-західному шельфі Чорного моря на площах: Безіменній, Гамбурцева, Голіцина, Десантній, Євпаторійській, Іллічівській, Каркінітській, Одеській, Південнобортовій, Південноголіцинській, Придніпровській, Сєльського, Федоровській, Фланговій, Центральній, Шмідта, Штильовій та Штормовій. Утворення верхньої крейди характеризуються карбонатно-силікатним літологічним типом розрізу і представлені переважно вапняками з підпорядкованим значенням мергелів та писальної крейди, рідше глинами, пісковиками і вулканогенними утвореннями. Узгоджено чи з переривом (?) залягають на докембрійських, палеозойських (?), тріасових та нижньокрейдових відкладах і перекриваються палеогеновими чи більш молодими. Виділяються у складі сеноманського, туронського, коньякського, сантонського, кампанського та маастрихтського ярусів. Розкрита товщина відкладів понад 2200 м. За результатами літобіостратиграфічних досліджень з урахуванням гефізичних даних свердловин (ГДС) сеноманські відклади пропонується виділяти у складі: семихатківської, партизанської, рифтової, гамбурцевської, безіменної та корніловської світ; турон-коньякські – мирнівської та борисівської світ; сантонські – борисівської, сєльського, федоровської, нижньодніпровської та північноарабатської світ; кампанські – сєльського та зміїної світ; маастрихтські – сєльського світи. Запропоновані стратони увійдуть до нової стратиграфічної схеми крейдових відкладів північно-західного шельфу Чорного моря та Пояснювальної записки до неї. Вперше виділено семихатківську, федоровську та сєльського світи. Скасовуються нахімовська, михайлівська, одеська, південноголіцинська, штормова та штильова світи, встановлені авторами статті у 2015 році. Товща пісковиків, андезитових порфіритів та вапняків, що характеризує турон-сантонські відклади Іллічівської площі залишається без змін.

Ключові слова: *стратиграфія, палеонтологія, літологія, каротаж, світа, верхньокрейдові відклади, свердловина, північно-західний шельф Чорного моря.*

Як цитувати: Іщенко Ігор, Якушин Леонід (2025). До питання про місцеві стратиграфічні підрозділи крейдових відкладів українського сектора північно-західного шельфу Чорного моря. Стаття 2. Верхня крейда. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*, (63), 51-70. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-04

In cites: Ishchenko Ihor, Yakushyn Leonid (2025). To the question of local stratigraphic subdivisions of Cretaceous sediments of the Ukrainian sector of the northwestern shelf of the Black Sea. Article 2. Upper cretaceous. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 51-70. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-04 [in Ukrainian]

Вступ. Ця публікація є продовженням висвітлення результатів комплексного дослідження стратиграфії крейдових відкладів північно-західного шельфу Чорного моря. Стан проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій наведено у попередній статті «До питання про місцеві стратиграфічні підрозділи крейдових відкладів українського сектора північно-західного шельфу Чорного моря. Стаття. 1. Нижня крейда», де зроблено висновок про актуальність удосконалення літолого-стратиграфічного каркасу осадових товщ крейдової системи північно-західного шельфу Чорного моря, перспективних на вуглеводні при проведенні подальших геолого-пошукових робіт [1].

Стаття присвячена стратиграфії верхньокрейдових відкладів досліджуємого регіону.

Мета дослідження. За комплексом методів на геофізичній основі (каротаж) провести ревізію місцевих стратиграфічних підрозділів верхньокрейдових відкладів українського сектора північно-західного шельфу Чорного моря, запропонованих колективом авторів у 2013 році [2], а також переглянути власні пропозиції щодо стратиграфії та геологічної будови цього регіону [3-6 та ін.] і які не увійшли до стратиграфічних схем 2013 року.

Об'єкт дослідження. Верхньокрейдові відклади українського сектора північно-західного шельфу Чорного моря.

Матеріал та методи дослідження. Проаналізовано матеріали буріння 35 глибоких свердловин, що розкрили верхньокрейдові відклади північно-західного шельфу Чорного моря та 14 свердловин прилеглого суходолу (рис. 1), новітні дані сейсморозвідувальних робіт та результати

© Іщенко Ігор, Якушин Леонід, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

попередніх геолого-геофізичних досліджень в регіоні, власні напрацювання та узагальнення, а також інформацію про геологічну будову території дослідження, отриману зі звітів про виконання науково-дослідних робіт з геологічного вивчення надр, що зберігаються у ДНВП «Геоінформ України».

Для виділення місцевих стратиграфічних підрозділів у відкладах сеноману, турону, коньяку та сантону використано розрізи свердловин, що розташовані на прилеглому суходолі, а саме: св. Мирнівська-1, св. Краснoперекопська-2, св. Генічеська-5 та с. Борисівська-3. Вони характеризують єдині умови осадконакопичення морського басейну, відповідно протягом кожного з перелічених віків в межах Південноукраїнської моноклінали.

Основні методи дослідження: біо- літостратиграфічний, літологічний та геофізичний.

В статті використано структурно-тектонічне районування північно-західного шельфу Чорного моря за [7-10].

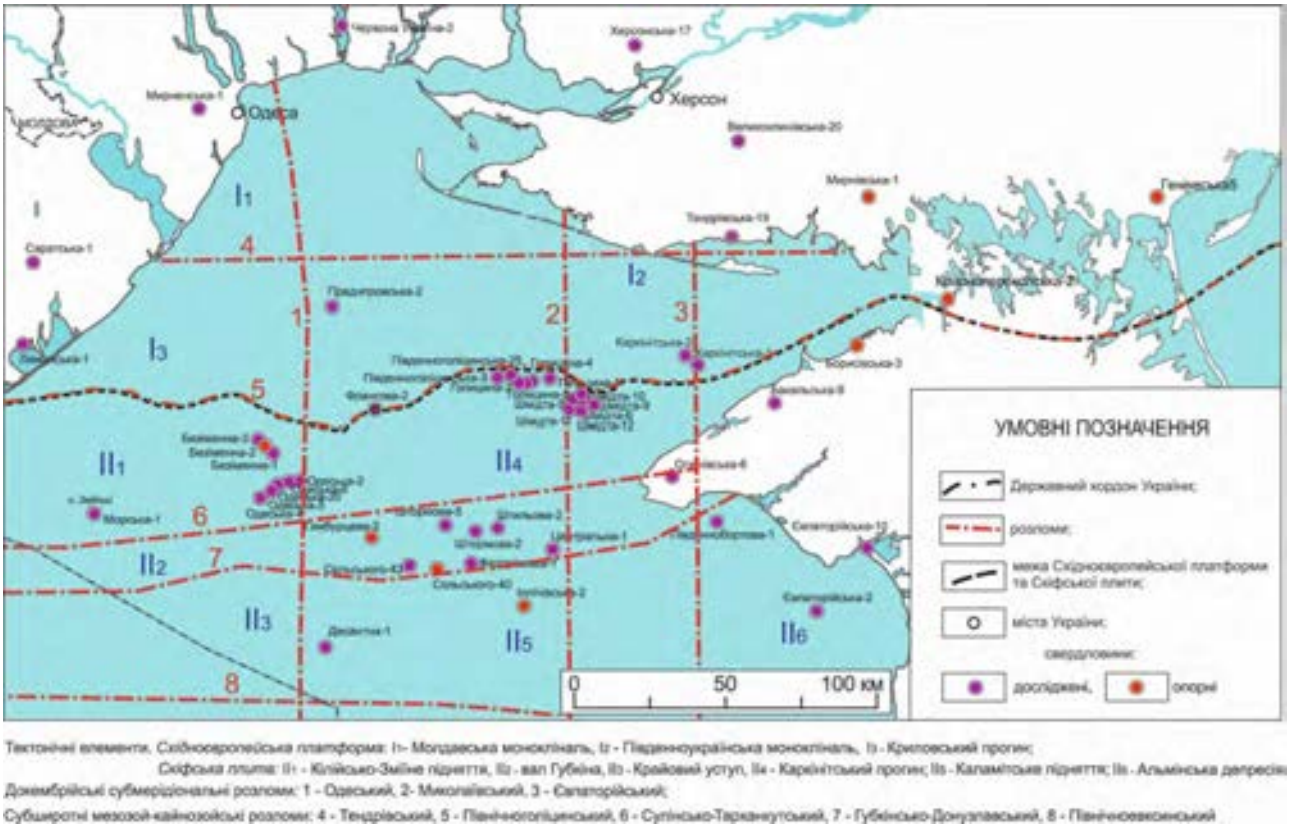


Рис. 1. Карта-схема території дослідження / Fig. 1. Map of the study area

Виклад основного матеріалу дослідження. Відклади верхнього відділу крейдової системи встановлено у розрізах 35 свердловин, що знаходяться на північно-західному шельфі Чорного моря на площах: Безіменній, Гамбурцева, Голіцина, Десантній, Євпаторійській, Іллічівській, Каркінітській, Одеській, Південнобортовій, Південноголіцинській, Прадніпровській, Федорівській, Фланговій, Центральній, Шмідта, Штильовій та Штормовій і характеризуються переважно карбонатно-силікатним літологічним типом розрізу.

Відклади відділу узгоджено чи з перервом залягають на докембрійських (?), палеозойських (?), тріасових та нижньокрейдових і перекриваються палеогеновими чи більш молодими.

Виділяються у складі сеноманського, туронського, коньякського, сантонського, кампанського та маастрихтського ярусів.

Розкрита товщина відкладів понад 2200 м.

За результатами біо- літостратиграфічних досліджень з урахуванням гефізичних даних свердловин (ГДС) сеноманські відклади пропонується виділяти у складі: семихатківської, партизанської, рифтової, гамбурцевської, безіменної та корніловської світ; турон-коньякські – мирнівської та борисівської світ; сантонські – борисівської, сєльського, федоровської, нижньодніпровської та північноарабатської світ; кампанські – сєльського та зміїної світ; маастрихтські – сєльського світи.

Нижче наведено опис світ та їх геологічний розріз.

Семихатківська світа (від назви с. Семихатки Генічеського району Херсонської області). Раніше виділялась як генічеська світа [2]. Виділяється вперше. Стратотип – розріз св. Генічесь-

ка-5 в інтервалі глибин 2119-2167 м, встановлений за літобіостратиграфічними даними та ГДС (рис. 2). Розповсюджена в межах Південноукраїнської моноклінали. Складена внизу пісками, пісковиками, алевролітами, мергелями та вапняками з включенням опок, гезів та жовен кременів, вище – органогенно-детритовими, шламово-детритовими вапняками та мергелями з підпорядкованим значенням аргілітів, пісків та пісковиків. Залягає зі стратиграфічним перериваом на утвореннях кристалічного фундаменту, трансгресивно чи з ерозійним контактом на відкладах тендрівської чи ярошикської світ альбського віку і перекривається зі стратиграфічним перериваом відкладами партизанської світи верхнього сеноману. Від підстилаючих та перекриваючих світ відрізняється переважаючим силікатним складом порід. Границі світи чітко фіксуються на електрокаротажних діаграмах та за іншими видами каротажу. Товщина відкладів до 80 м. Включає нижню підтовщу мергельно-вапнякової товщі з пісковиками, нижню підтовщу товщі алевролітів, писальної крейди та крейдоподібних мергелів, нижню підтовщу товщі вапняків з глауконітовими мергелями, верхню частину тарутинської товщі, нижню частину ведмедівської та бериславської світ [2]. Відноситься до раннього сеноману за форамініферами *Rotalipora appeninnica* (Renz)

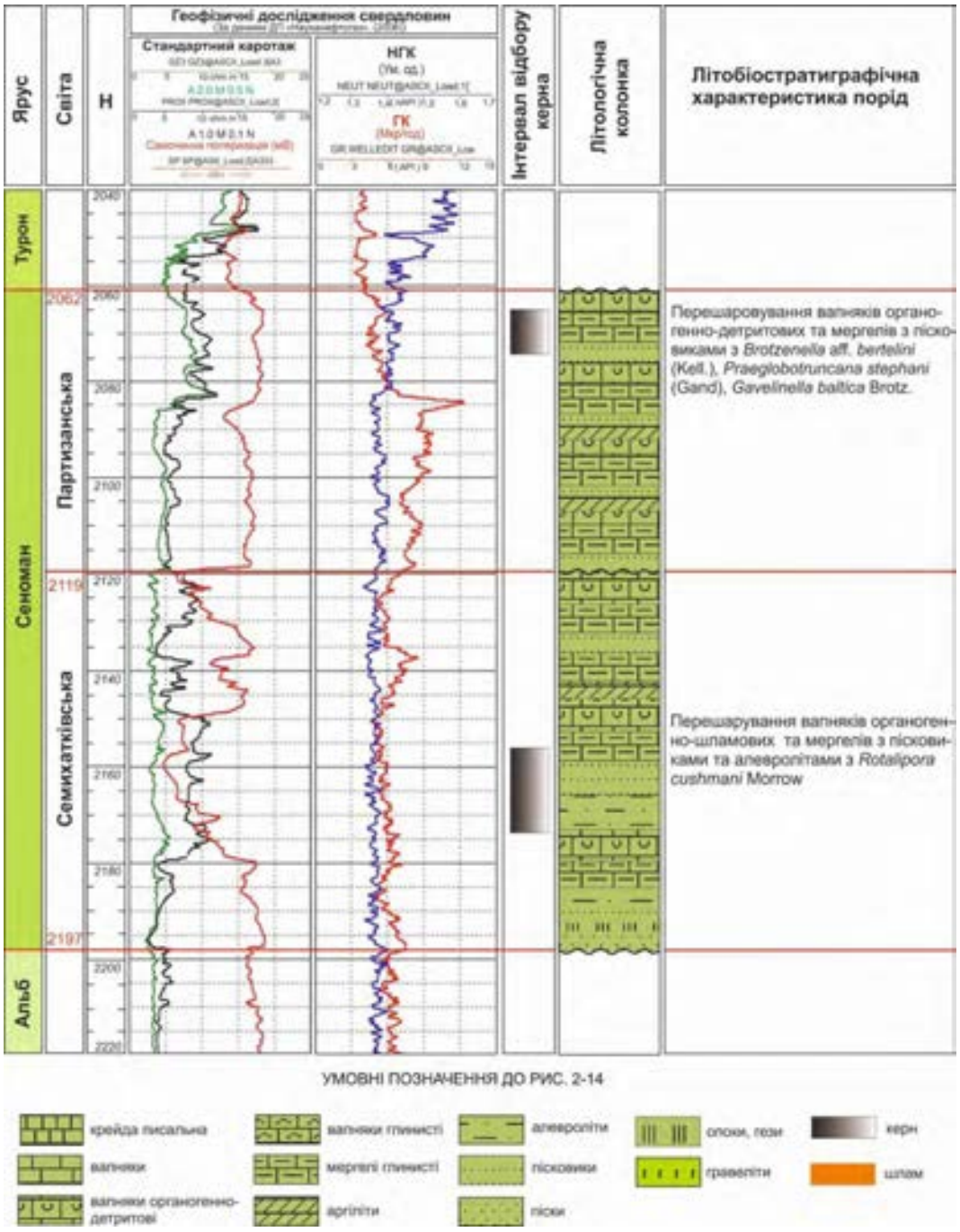


Рис. 2. Стратотипи семихатківської та партизанської світ /
Fig. 2. Stratotype of the Semichatkivska and Partisanska Formation

та *Hedbergella infracretacea* (Glaes.) [10-15 та ін.]. Датована раннім сеноманом за форамініферами [2, 11-13].

Партизанська світа (від назви смт. Партизани Генічеського району Херсонської області [14]. Стратотип – розріз св. Генічеська-5 в інтервалі глибин 2062-2119 м, встановлений за літобіостратиграфічними даними та ГДС (рис. 2). Розповсюджена в межах Південноукраїнської моноклінали. Складена перешаруванням органогенно-детритових вапняків, мергелів, пісковиків та аргілітів. Залягає зі стратиграфічним перериво на утвореннях семихатківської світи нижнього сеноману і з перериво перекривається відкладами мирнівської світи турон-коньякського віку. Від підстилаючих відкладів відрізняється літологічним складом порід, а саме переважанням у розрізі карбонатних утворень над силікатними на відміну від нижчезалягаючої семихатківської світи. Від перекриваючої мирнівської світи відрізняється складом порід, що фіксується каротажними кривими. Товщина відкладів до 70 м. Включає нижню підтовщу мергельно-вапнякової товщі з пісковиками, нижню підтовщу товщі вапняків з глауконітовими мергелями, нижню підтовщу товщі перешарування мергелів та вапняків, нижню частину ведмедівської та бериславської світ [2]. Відноситься до пізнього сеноману за форамініферами: *Brotzenella* aff. *bertelini* (Kell.), *Praeglobotruncana stephani* (Gand), *Gavelinella baltica* Brotz. [2, 11, 13, 15-17], спорами та пилком [18]. Датована пізнім сеноманом за форамініферами.

Рифтова світа (від назви структури у Каркінітському прогині на північно-західному шельфі Чорного моря) [2]. Стратотип – розріз св. Гамбурцева-2 в інтервалі глибин 3184-3474 м, встановлений за літобіостратиграфічними даними та ГДС (рис. 3). Розповсюджена у Каркінітському прогині, південній частині Південноукраїнської моноклінали та Крайового уступу. Складена мергелями сірими та темно-сірими, сильноглинистими, слабослюдистими з прошарками вапняків темно-сірих, щільних, міцних. Залягає з ерозійним контактом чи трансгресивно на відкладах євпаторійської світи альбського віку і перекривається згідно або з перериво утвореннями гамбурцевської світи сеноманського віку чи сєльського світи кампан-маастрихту. Від євпаторійської світи, яка складена теригенно-глинистими та вулканогенно-уламковими породами відрізняється карбонатним літологічним типом розрізу. Від перекриваючих утворень також відрізняється за літологією порід, що відображено у записах кривих ГДС. Границі світи чітко фіксуються на електрокаротажних діаграмах та за іншими видами каротажу. Розкрита товщина відкладів до 300 м. Включає нижню частину товщі пісковиків та пісків, нижню частину товщі вапняків з прошарками глин, нижню частину товщі сірих пелітоморфних вапняків та нижню підтовщу каркінітської товщі [2]. Датована раннім сеноманом за форамініферами *Rotalipora brotzeni* (Sigal) [2, 13, 19], нанопланктоном: *Gartnerago segmentatum* та *Eiffelithus turriseifelii* [20] та молюском *Inoceramus crippsii* Mant. [2].

Гамбурцевська світа (від назви структури у Каркінітському прогині на північно-західному шельфі Чорного моря [3]. Стратотип – розріз св. Гамбурцева-2 в інтервалі глибин 2814-3184 м, встановлений за літобіостратиграфічними даними та ГДС (рис. 3). Розповсюджена в межах Каркінітського прогину та південної частини Південноукраїнської моноклінали. Складена вапняками сірими та темно-сірими, пелітоморфними з фауною та вапняками органогенними (форамініферовими, коколітовими, форамініферово-коколітовими), щільними, міцними, іноді кременистими з алевритовою домішкою. Залягає згідно чи з ерозійним контактом на відкладах рифтової світи нижнього сеноману і перекривається з перериво утвореннями борисівської світи турон-ранньосантонського віку. Від перекриваючих відкладів відрізняється мінеральною структурою вапняків, від підстилаючих – літологічним складом порід, що фіксується на каротажних діаграмах. Розкрита товщина відкладів до 400 м. Характеризує нижню частину товщі пісковиків та пісків, нижню частину товщі вапняків з прошарками глин та нижню частину товщі сірих пелітоморфних вапняків [2]. Відноситься до середнього-пізнього сеноману за форамініферами: Rotalipora reicheli (Morn.), R. cushmani Morr., R. deeckei (Franke), Gavelinella cenomanica Brotz. [2, 13, 19] та нанопланктоном: Litraphidites acutus, Helenia chiastia [20]. Комплексні дослідження відкладів сеноману з розрізів глибоких свердловин Одеської, Гамбурцевської, Голицинської та Південноголицинської площ з використанням геофізичних методів дослідження (каротаж), результатів палеонтологічних визначень органічних решток Л.Ф. Плотнікової, А.В. Шумника та літологічної характеристики відкладів за керновим матеріалом, дозволили встановити фаціальну відмінність утворень нижнього та середнього-верхнього під'ярусів. Границі між ними носять ерозійний характер, що добре видно на каротажних кривих. Також ерозійною є границя між утвореннями середнього-верхнього сеноману та турону. Наведене вище стало підставою для перегляду об'єму товщ, зображених на стратиграфічній схемі 2013 року та виділенню гамбурцевської світи, яка за фаціально-літологіч-

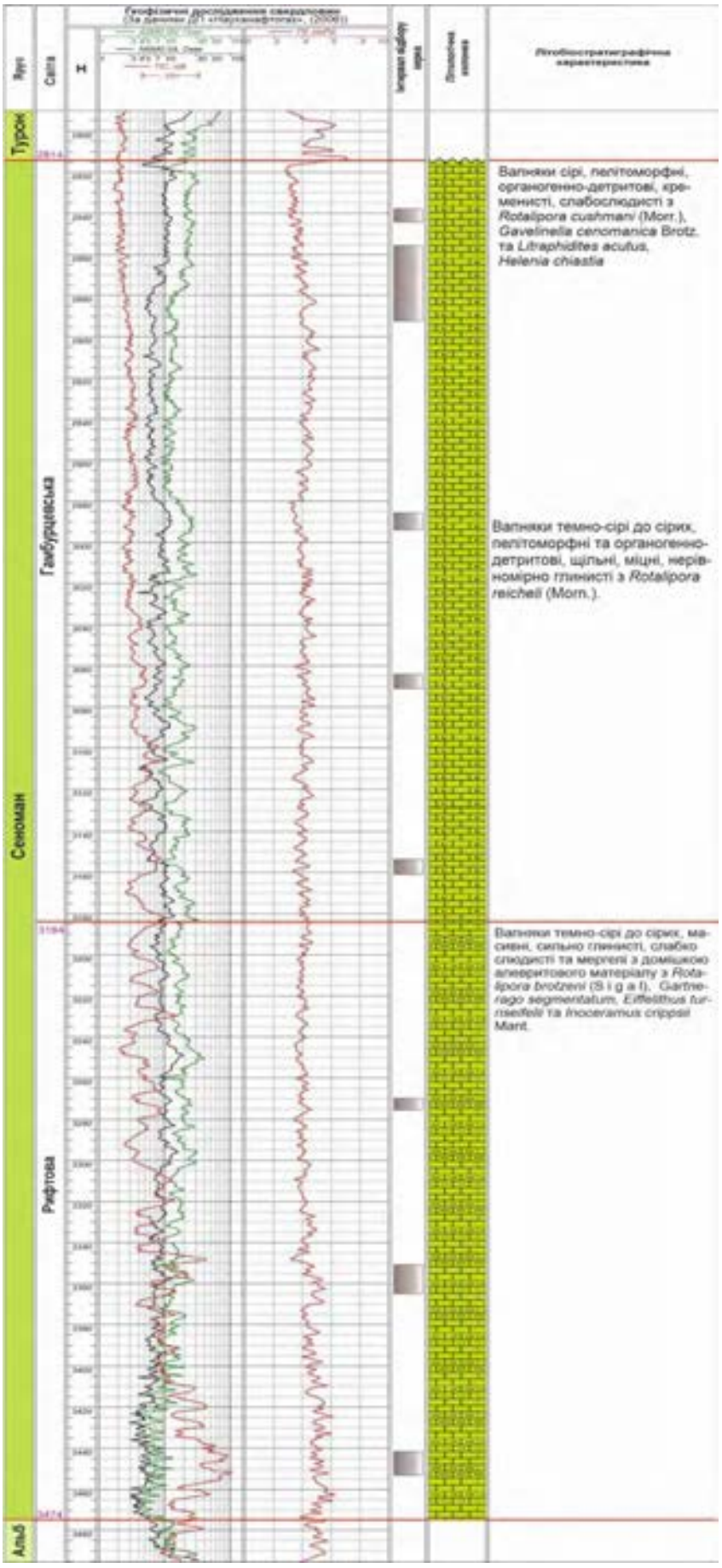


Рис. 3. Стратотип рифтової та гамбурцевської світ /
Fig. 3. Stratotype of the Riftova and Hamburcevska Formation

ною і палеонтологічною схожістю та кореляцією за матеріалами ГДС включає нижню частину товщі вапняків з прошарками глин та нижню частину товщі пелітоморфних вапняків [2].

Безіменна світа (від назви структури на північно-східному схилі Кілійсько-Зміїного підняття, що на північно-західному шельфі Чорного моря) [3]. Стратотип – розріз св. Безіменна-2 в інтервал глибин 1802-2184 м, встановлений за літобіостратиграфічними даними та ГДС (рис. 4). Розповсюджена в межах Губкінсько-Кілійсько-Зміїної зони підняттів. Складена пісковиками сірими до брунатно-сірих, грудкуватими, кварцовими та кварц-польовошпатовими, середньо- та крупнозернистими, вапнистими, слабко та середньо- зцементованими, гравелітами дрібноуламковими, туфопісковиками, пісками та аргілітами Залягає зі стратиграфічним перервом на відкладах євпаторійської світи альбського ярусу чи корніловської світи сеноману і перекривається зі стратиграфічним перервом товщею пісковиків, андезитових порфіритів та вапняків турон-ранньосантонського віку чи утвореннями сєльського світи середнькампанськомаастрихтського віку. Відрізняється від підстилаючих і перекриваючих відкладів силікатним (пісковики, гравеліти, піски тощо) складом порід. Границі світи чітко фіксуються на електрокаротажних діаграмах та за іншими видами каротажу. Розкрита товщина відкладів 390 м. Включає нижню частину товщі пісковиків та пісків, нижню частину товщі вапняків з прошарками глин, нижню частину товщі сірих пелітоморфних вапняків та нижню підтовщу каркінітської товщи [2], а також нахімовську світу, встановлену раніше [3], тому останню пропонується скасувати. Датована середнім-пізнім сеноманом за форамініферами *Rotalipora cushmani* Morr. та *R. deeckei* (Franke) [13, 19].

Корніловська світа (від назви структури на Каламітському піднятті, що на північно-західному шельфі Чорного моря) [3]. Стратотип – розріз св. Іллічівська-2 в інтервалі глибин 2046-2230 м, встановлений за літобіостратиграфічними даними та ГДС (рис. 5). Розповсюджена в межах Каламітського валу. Складена перешаруванням пісковиків сірих, зеленувато-сірих, різнозернистих, олігоміктових, кварцових та кварц-польовошпатових, масивних, середньої щільності, гравелітів дрібноуламкових та аргілітів темно-сірих щільних, масивних, слюдистих алевритистих. Залягає з ерозійним контактом чи трансгресивно на відкладах альбу і перекривається зі стратиграфічним перервом утвореннями пізнього сеноману. Від підстилаючих відкладів відрізняється літологічним складом порід. Розкрита товщина відкладів до 190 м. Включає нижню частину товщі пісковиків, діабазових порфіритів та вапняків [2]. Відноситься до раннього сеноману за знахідками форамініфер *Rotalipora appeninnica* (Renz.) [13, 19]. Датована сеноманом за форамініферами.

Мирнівська світа (від назви смт. Мирне, Каланчакського району Херсонської області) [14]. Раніше виділялась як товща [2].

Стратотип – сукупність розрізів: св. Мирнівська-1 в інтервалі глибин 2083-2253 м (рис. 6) та св. Красноперекопська-2 в інтервалі глибин 2297-2521 м. (рис. 7), встановлених за літобіостратиграфічними даними та ГДС. Розповсюджена в межах Причорномор'я та Приазов'я. Складена крейдою писальною, мергелями крейдоподібними та вапняками органогенними. Залягає з переривом чи узгоджено на відкладах партизанської світи верхнього сеноману, перекривається з переривом відкладами сєльського світи верхнього сантону. Відрізняється від підстилаючих та перекриваючих відкладів літологічним складом порід., що чітко фіксується на каротажних діаграмах. Товщина відкладів до 400 м. Включає верхню частину нижньої підсвіти та нижню частину середньої підсвіти бериславської світи, нижню та середню частини каркінітської світи, верхню частину нижньої підсвіти та нижню частину середньої підсвіти ведмедівської світи, нижню підсвіту та нижню частину середньої підсвіти сиваської світи та нижню підсвіту та нижню частину середньої підсвіти балашовської світи, середню підтовщу мергельно-вапнякової товщі з пісковиками, середню підтовщу товщі алевролітів, писальної крейди та крейдоподібних мергелів, нижню та середню частини товщі перешарування мергелів та вапняків та нижню та середню частини товщі мергелів сірих окременілих [2]. Датована за туронськими форамініферами: *Gavelinella moniliformis* (Rss.), *G. ammonoides* (Reuss.), *G. kelleri* Mjatl., *G. praeinfrasantonica* (Mjat I.), встановленних у різні роки [2, 11, 13, 21, 22 та ін.] та коньякськими: *Stensioeina granulata granulata* (Olbertz.), *S. emsgherica* Baryshn., *Gavelinella praeinfrasantonica* (Mjatl.) та *G. thalmanni* Brotz. [2, 11, 13, 23].

Борисівська світа (від назви площі в Роздольненськоу районі АР Крим). Стратотип – розріз св. Борисівська-3 в інтервалі глибин 2727-3521 м (рис. 8, 9) та розріз св. Гамбурцева-2 в інтервалі глибин 1954-2080 м (рис. 10), встановлені за літобіостратиграфічними даними та ГДС [4]. В межах північно-західного шельфу Чорного моря розповсюджена на території Каркінітського прогину та прилеглих до нього територіях. Складена у підошві мергелями глинистими, вище за розрізом вапняками світло-сірими до білих коколіто-

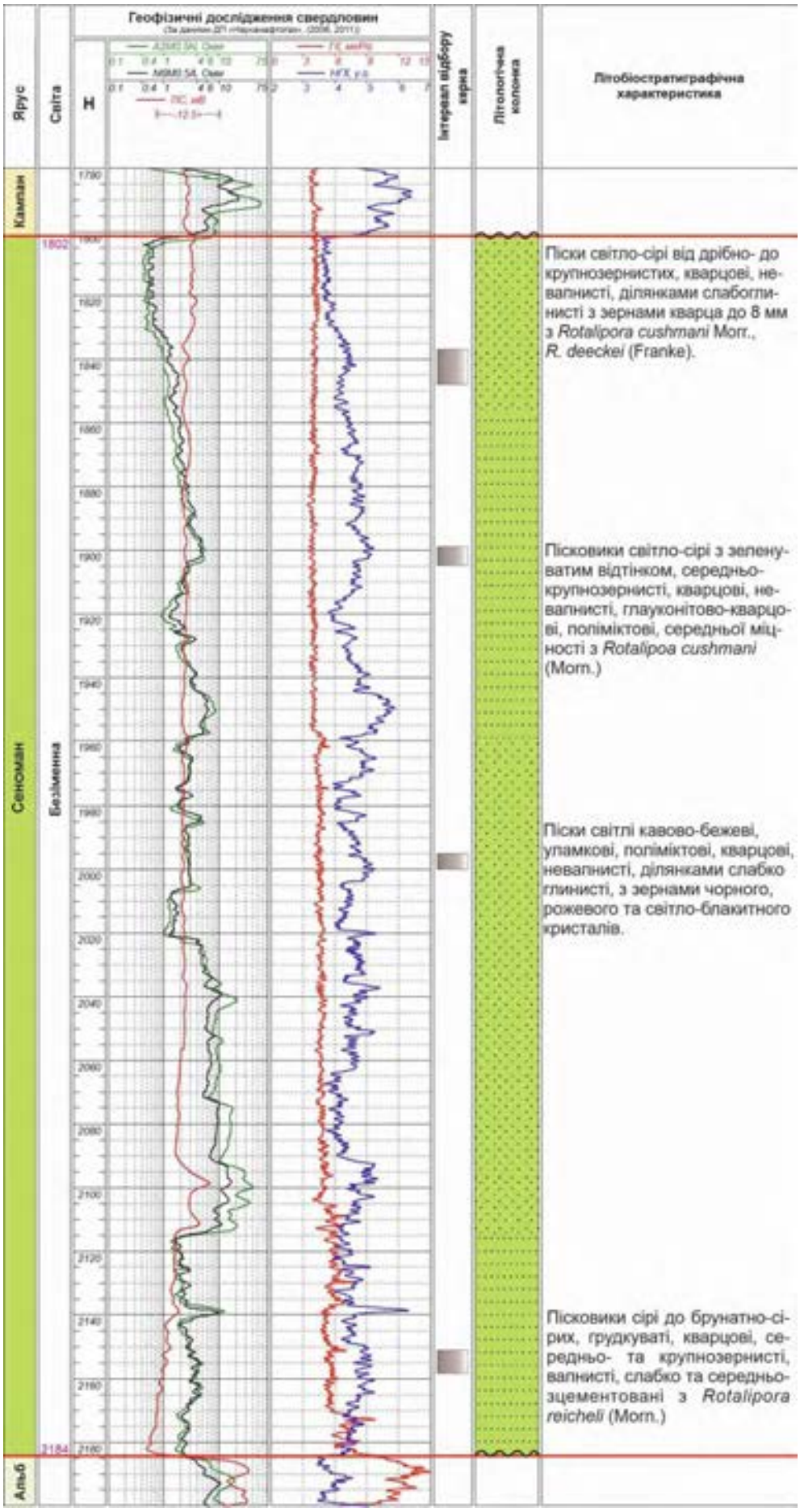


Рис. 4. Стратотип безіменної світи / Fig. 4. Stratotype of the Bezimenna Formation

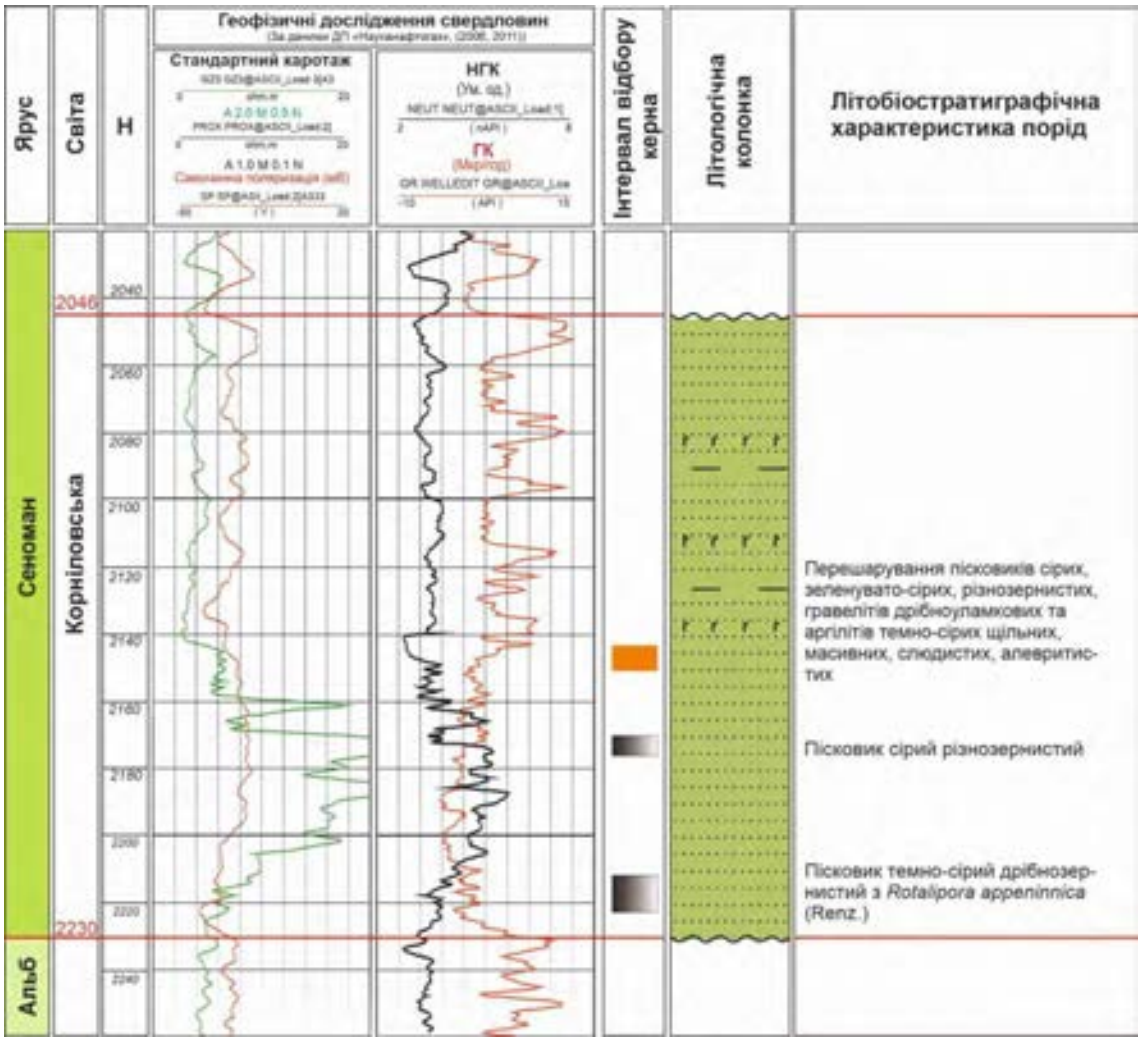


Рис. 5. Стратотип корніловської світи / Fig. 5. Stratotype of the Kornilovska Formation

вими з прошарками вапняків органогенно-детритових коколітово-форамініферових, тонкозернистих з фауною та крейди писальної. Залягає зі стратиграфічним перериву на утвореннях гамбурцевської світи сеноману та з перериву перекриваються утвореннями сєльського світи пізньосантонсько-маастрихтського віку. Від підстилаючих та перекриваючих відкладів відрізняється мінеральною структурою вапняків, що фіксується на каротажних діаграмах. Товщина відкладів до 800 м. Борисівська світа в межах північно-західного шельфу Чорного моря включає відклади михайлівської, одеської, південноголіцинської [3] та оленівської світ [4], встановлених раніше, тому їх пропонується скасувати. Об'єднує середню частину товщі вапняків з прошарками глин, середню частину товщі сірих пелітоморфних вапняків, середню підтовщу каркінітської товщі [2]. Нижня частина світи датована туроном за форамініферами: *Gavelinella moniliformis* (Rss.), *G. ammonoides* (Reuss.), *G. kelleri* Mjatl., *G. praeinfrasantonica* (MjatI.). Верхня частина – коньяком за форамініферами: *Stensioeina granulata* Olb., *Gavelinella thalmanni* Brotz., *Gavelinella infrasantonica* (Balakhm.) [2, 11-13] та раннім сантоном за форамініферами *Gavelinella infrasantonica* (Balakhm.), *Stensioeina exculpta* Olb., *S. granulata granulata* (Olb.) [2, 12, 13] та нанопланктоном *Lucianorhabdus cayeuxii* [20].

Турон-сантонські відклади, що представлені андезитовими та діабазовими порфіритами з прошарками пісковиків і розкриті св. Іллічівська-2 в інтервалі глибин 1200-1745 м, на стратиграфічній схемі 2006 р. [13] віднесено до каламітської світи. На стратиграфічній схемі 2013 року вони характеризують середню частину товщі пісковиків, діабазових порфіритів та вапняків турон-сантонського віку. Враховуючи те, що ці утворення розповсюджені локально (= точково), тільки в межах Іллічівської площі на якій знаходився однойменний вулкан, вони не можуть характеризувати літологічний тип розрізу для всього Каламітського валу і тому виділення цих утворень Л.Ф. Плотніковою у ранзі товщі вважаємо правильним [2].

Нижньодніпровська світа (від назви території нижньої течії р. Дніпро). Стратотип – роз-

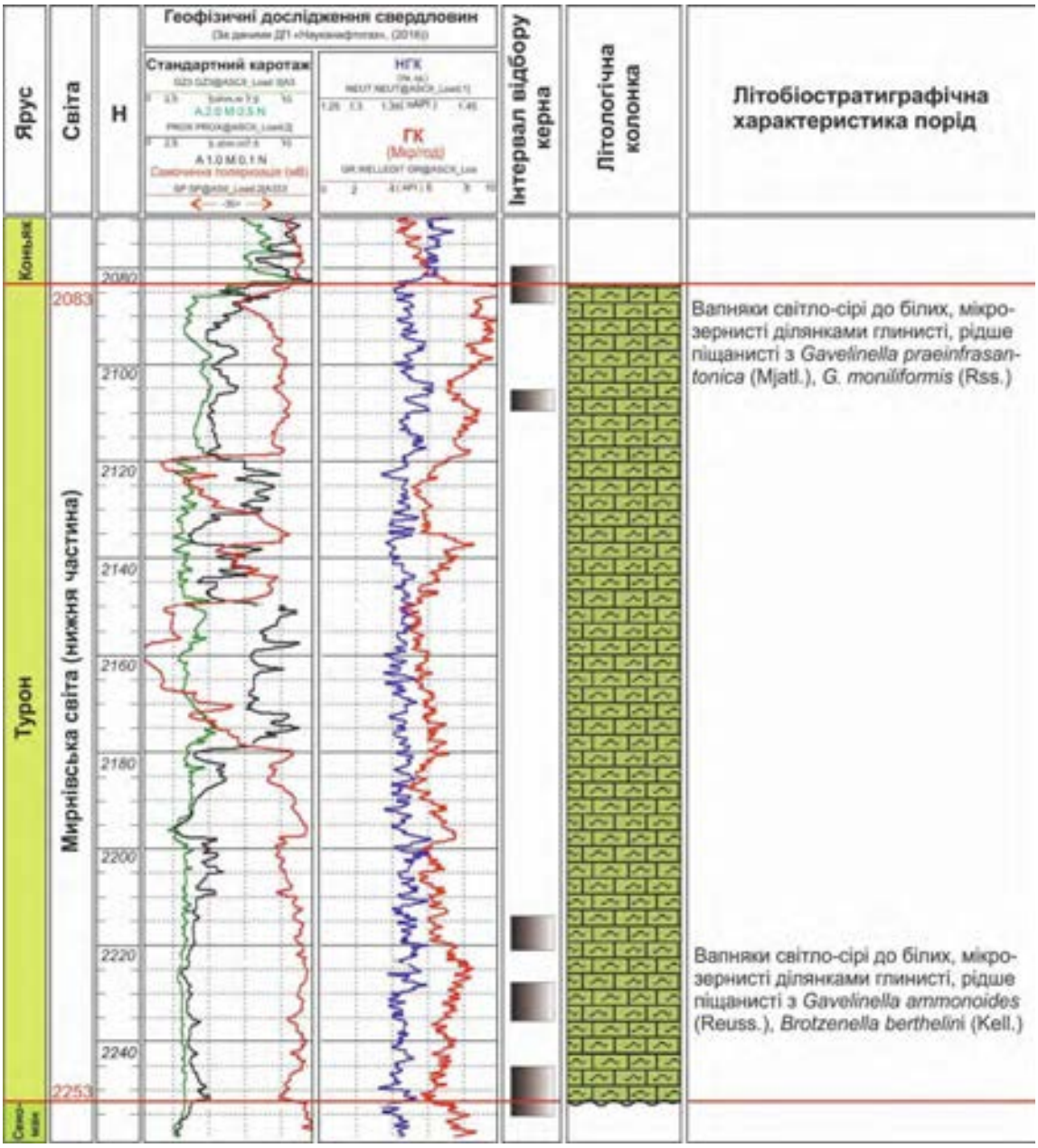


Рис. 6. Стратотип мирнівської світи (нижня частина) /
Fig. 6. Stratotype of the Mirnivska Formation (lower part)

різ св. Мирнівська-1 в інтервалі глибин 1959-1996 м (рис. 11), встановлений за літобіостратиграфічними даними та ГДС. Виділяється в межах Південноукраїнської моноклінали та у Присивашші. Складена крейдоподібними мергелями з прошарками писальної крейди та вапняків. Залягає з ерозійним контактом чи трансгресивно на відкладах мирнівської світи, перекривається зі стратиграфічним перервом відкладами північноарабатської світи. Товщина відкладів до 40 м. Комплексні дослідження дозволили нам виділити відклади сантонського ярусу у верхньокрейдовій товщі території дослідження та зкорелювати їх в межах Південноукраїнської моноклінали та Присивашшя. Встановлено, що ці утворення незгідно залягають на відкладах турону-коньяку мирнівської світи та з перервом перекриваються кампанськими утвореннями сєльського світи, що добре видно на каротажних кривих. Встановлено відсутність у розрізі середнього під'ярусу сантону. Вищесказане стало основою для виділення нижньодніпровської та північноарабатської світ замість товщ попередньої схеми [2]. Нижньодніпровська світа за фаціально-літологічною і палеонтологічною схожістю та кореляцією за матеріалами ГДС включає середню частину сеноман-кампанської бериславської, нижню частину нижньої частини сантон-кампанської криничкінської, верхню частину турон-ранньосантонської каркінітської, верхню частину нижньої підсвіти сеноман-маастрихтської ведмедівської, верхню частину нижньої підсвіти

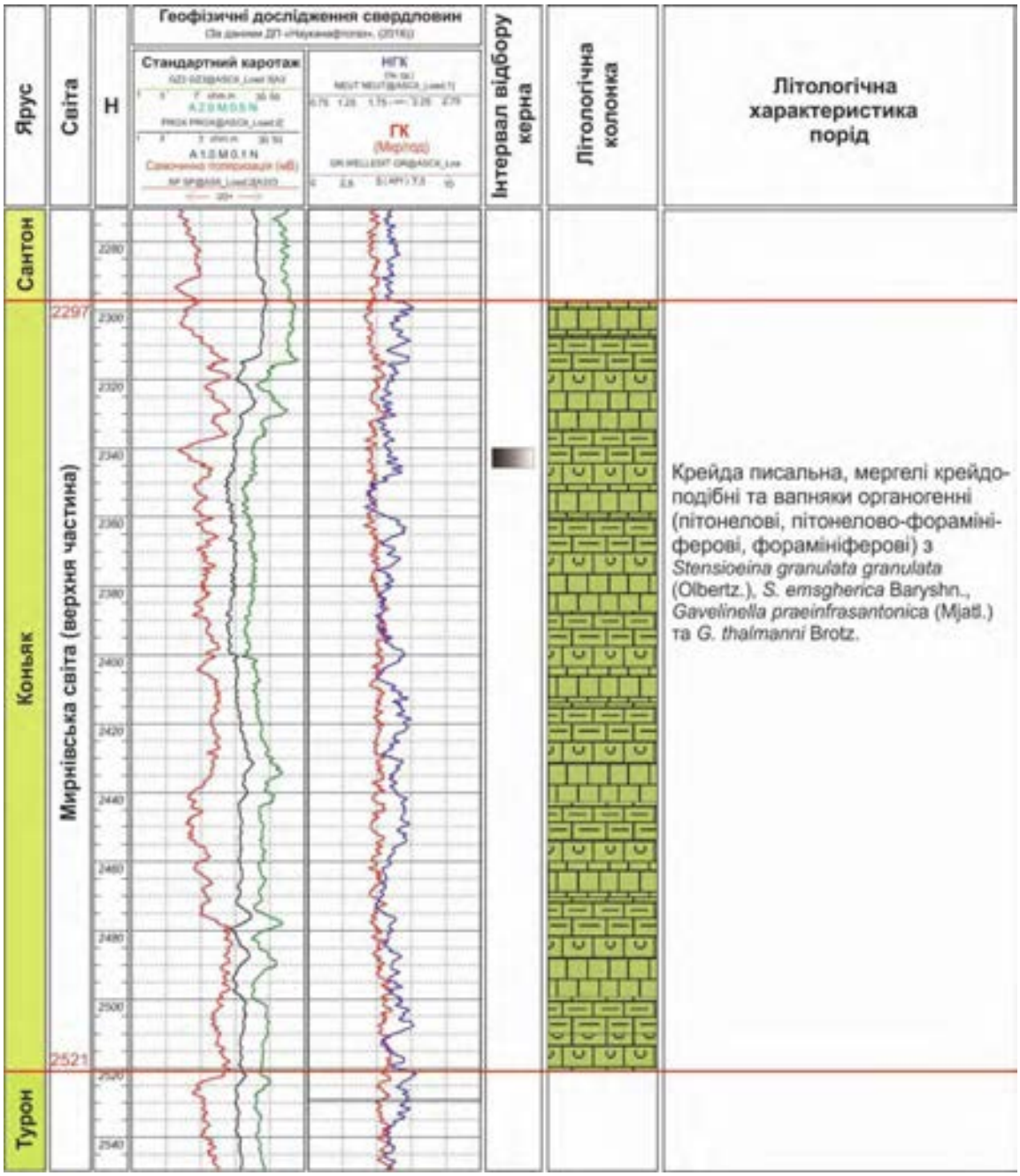


Рис. 7. Стратотип мирнівської світи (верхня частина) /
Fig. 7. Stratotype of the Mirnivska Formation (upper part)

турон-маастрихтської сиваської та верхню частину нижньої підсвіти турон-маастрихтської балашовської світи, верхню частину середньої підтовщі мергельно-вапнякової товщі з пісковиками, верхню частину середньої підтовщі товщі алевролітів, писальної крейди та крейдоподібних мергелів, середню частину товщі вапняків з глауконітовими мергелями та середню частину товщі перешарування мергелів та вапняків. Датована раннім сантоном за форамініферами *Gavelinella infrasantonica* (Mjatl.), *G. thalmanni* Brotz., *Globotruncana concavata* Brotz. [2,11-13, 22].

Північноарабатська світа (від назви коси Арабатська стрілка в західній частині акваторії Азовського моря). Стратотип – розріз св. Мирнівська-1 в інтервалі глибин 1910-1959 м (рис. 11), встановлений за літобіостратиграфічними даними та ГДС. Виділяється в межах Південноукраїнської моноклінали та у Присивашші. Складена вапняками пелітоморфними з прошарками крейдоподібних мергелів та писальної крейди. Залягає зі стратиграфічним перериво на відкладах нижньодніпровської світи, перекривається з ерозійним контактом чи зі стратиграфічним перериво відкладами сєльського світи. Товщина відкладів до 50 м. Підставою для виділення північноарабатської світи слугувало встановлення стратиграфічного перериву в об'ємі середнього

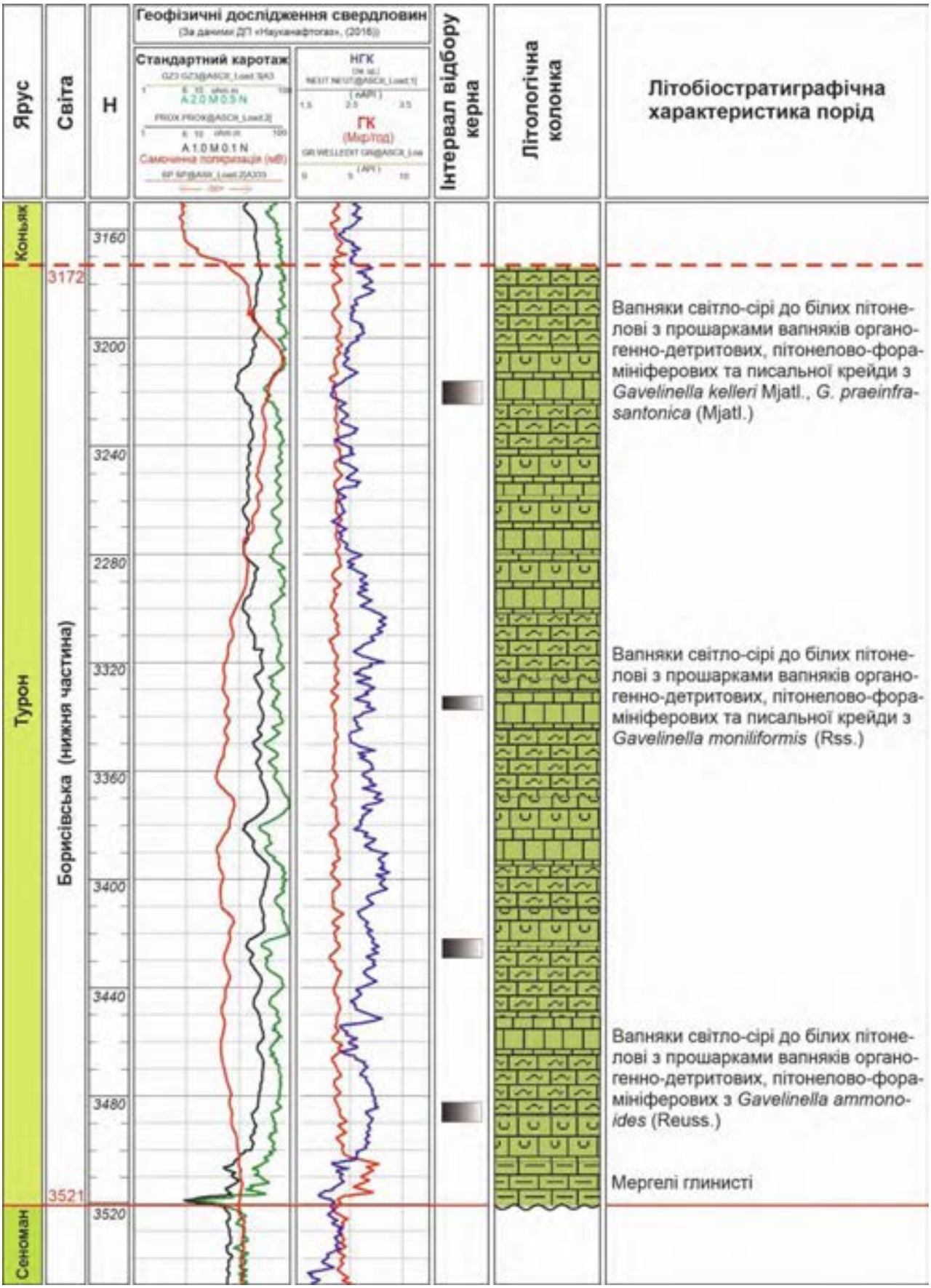


Рис. 8. Стратотип борисівської світи (нижня частина) /
Fig. 8. Stratotype of the Borysivska Formation (lower part)

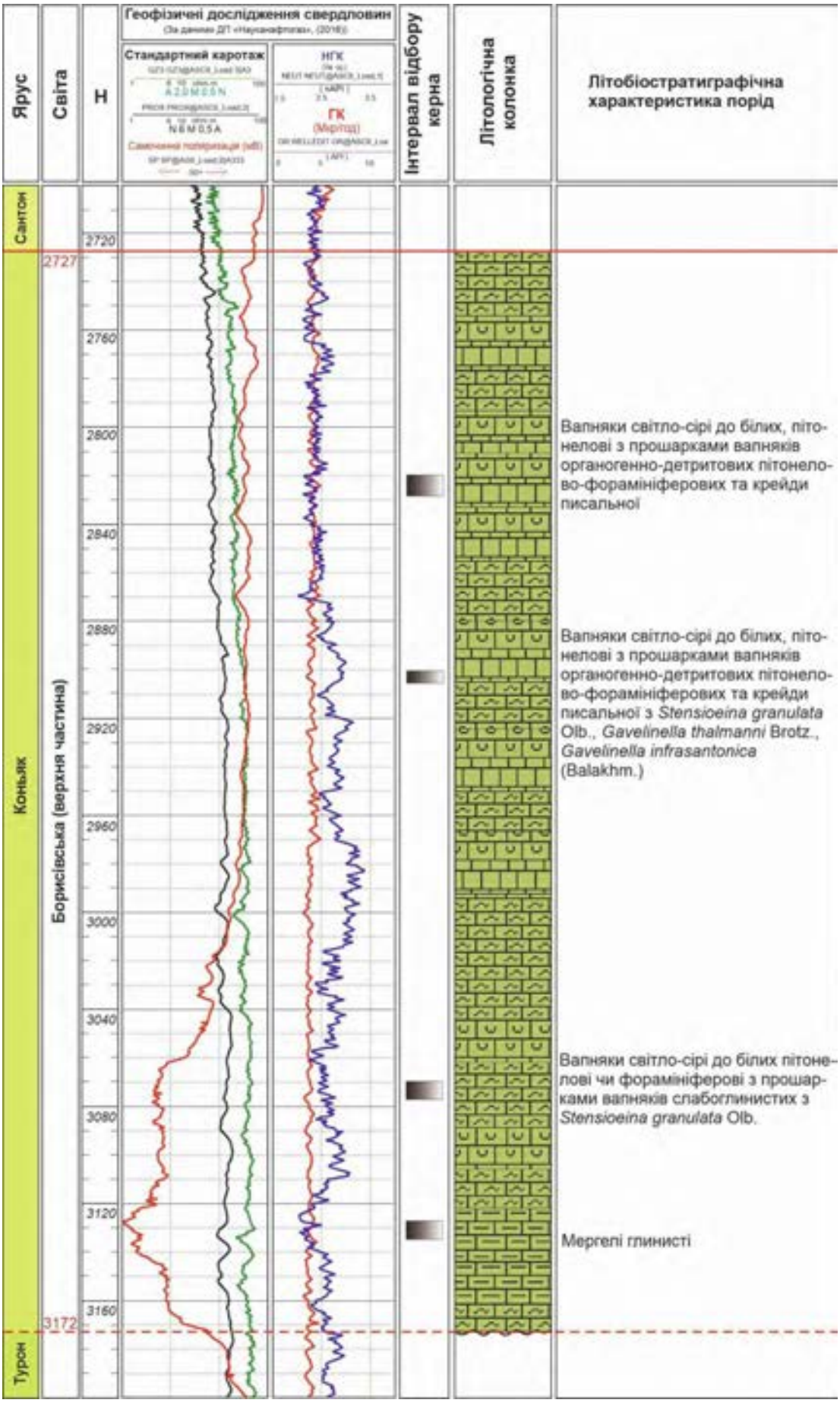


Рис. 9. Стратотип борисівської світи (верхня частина) /
Fig. 9. Stratotype of the Borysivska Formation (upper part)

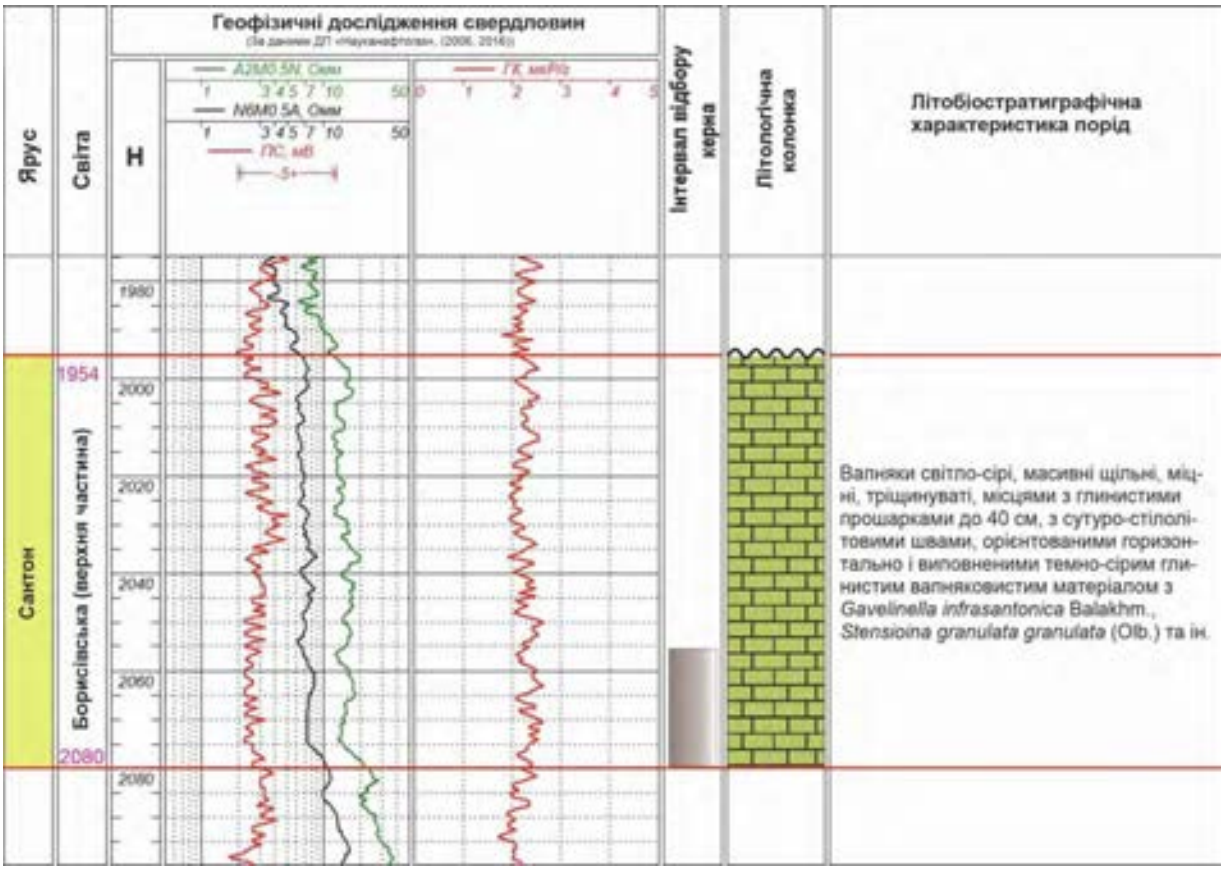


Рис. 10. Стратотип борисівської світи (продовження верхньої частини) /
Fig. 10. Stratotype of the Borysivska Formation (continuation upper part)

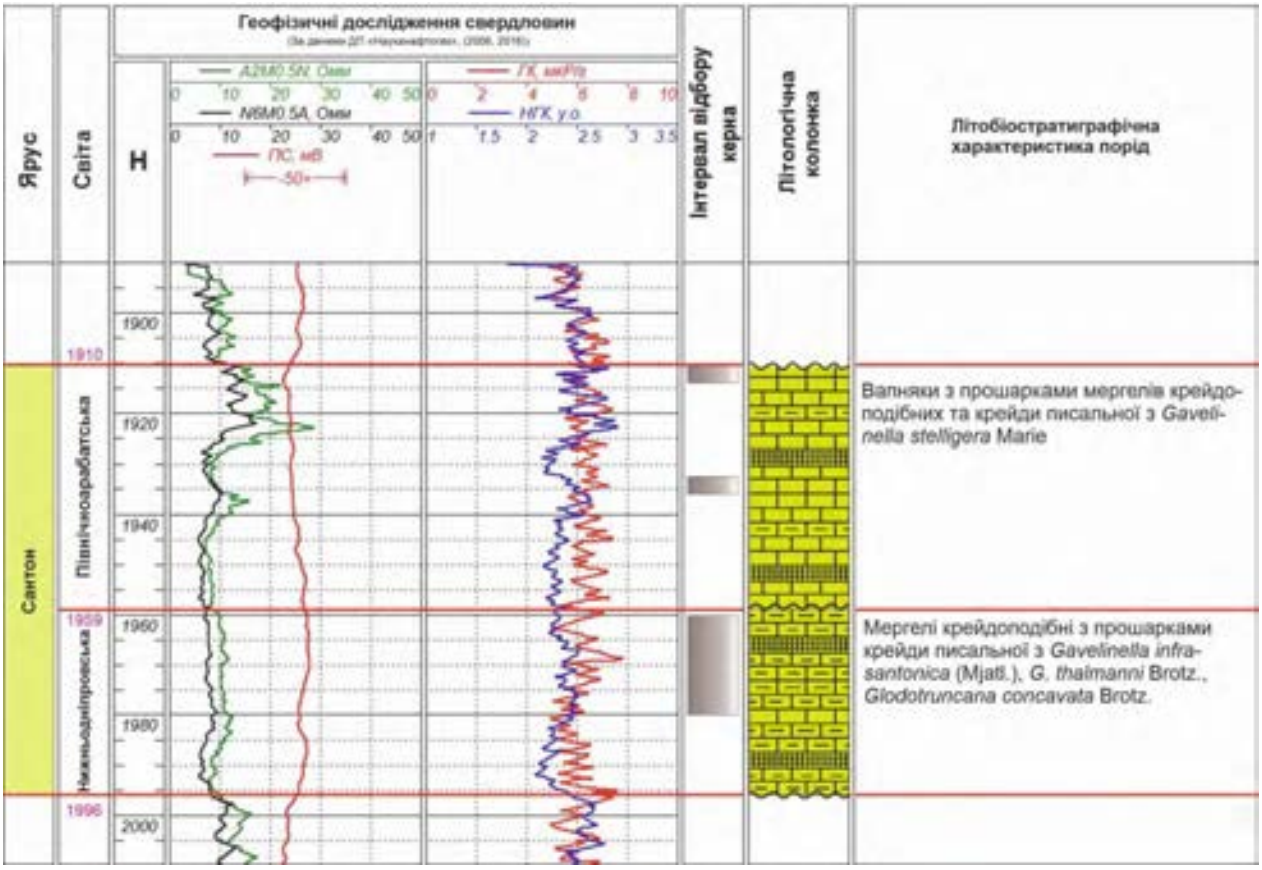


Рис. 11. Стратотипи нижньодніпровської та північноарабатської світ /
Fig. 11. Stratotype of the Nyzhnodniprovska and Pivnichnoarabatska Formation

під'ярусу сантонського ярусу на всій території дослідження та ерозійного характеру границі сантонських утворень з кампанськими, а також однорідний фаціально-літологічний склад утворень верхнього під'ярусу сантону. Північноарабатська світа за фаціально-літологічною і палеонтологічною схожістю та кореляцією за матеріалами ГДС включає нижню частину нерозчленованої пізньосантонсько-ранньокампанської новомаячкінської світи, середню частину сеноман-кампанської бериславської, верхню частину сантон-кампанської криничкінської, верхню частину турон-ранньосантонської каркінітської, верхню частину нижньої підсвіти сеноман-маастрихтської ведмедівської, верхню частину нижньої підсвіти турон-маастрихтської сиваської, верхню частину нижньої підсвіти турон-маастрихтської балашовської світ, нижню частину азовської товщі, верхню частину середньої підтовщі мергельно-вапнякової товщі з пісковиками, верхню частину середньої підтовщі товщі алевролітів, писальної крейди та крейдоподібних мергелів, середню частину товщі вапняків з глауконітовими мергелями та середню частину товщі перешарування мергелів та вапняків. Датована пізнім сантоном за форамініферами *Gavelinella stelligera* (Marie) [2,11-13, 22].

Федоровська світа (від назви структури в Каркінітському прогині). Виділяється вперше. Стратотип розріз – св. Гамбурцева-2 в інтервалі глибин 1918-1954 м (рис. 12), встановлений за літобіостратиграфічними даними та ГДС. Виділяється у Каркінітському прогині та деяких прилеглих до нього територіях північно-західного шельфу Чорного моря. Складена світло-сірими до білих вапняками пелітоморфними слабоглинистими з органічними рештками з прошарками вапняків пітонелових чи форамініферових. Залягає зі стратиграфічним перериванням на відкладах південноголицинської світи, перекривається зі стратиграфічним перериванням чи з ерозійним контактом відкладами сєльського світи. Товщина відкладів до 60 м. Встановлення регіонального перериву в осадконакопиченні в об'ємі середнього

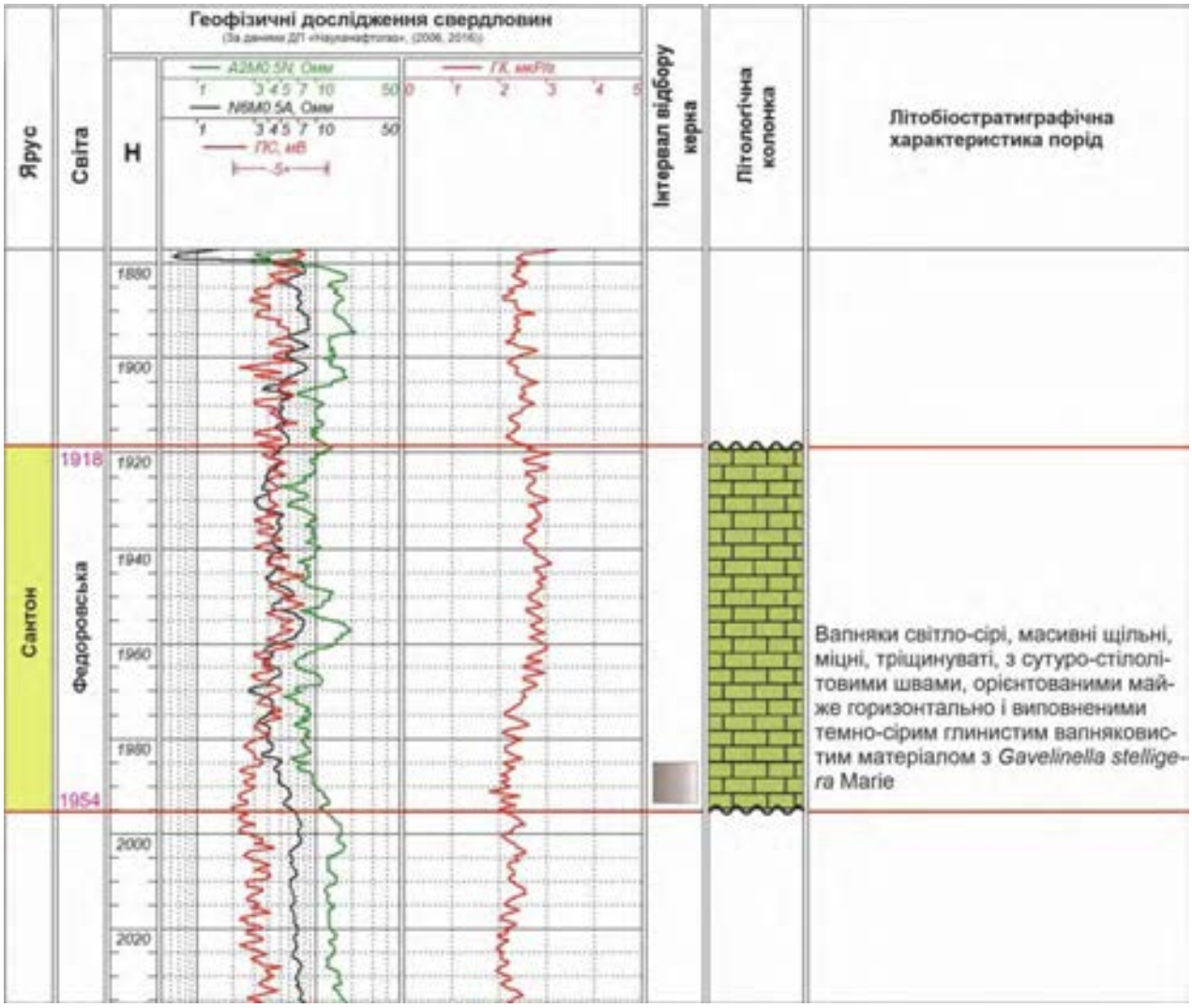


Рис. 12. Стратотип федоровської світи / Fig. 12. Stratotype of the Fedorovska Formation

під'ярусу сантону [3, 13], відсутність на більшій частини території Каркінітського прогину утворень нижнього кампану [3] та однотипний фаціально-літологічний склад утворень верхнього сантону на території дослідження дозволило виділити означені відклади у федоровську світу. За фаціально-літологічною і палеонтологічною подібністю та кореляцією за матеріалами ГДС вона об'єднує верхи середньої частини товщі вапняків з прошарками глин, верхи середньої частини товщі пелітоморфних вапняків та верхи середньої підтовщі каламітської товщі виділені у стратиграфічній схемі 2013 року. Датована пізнім сантоном за *Gavelinella stelligera* (Marie) [2, 12, 13].

Сєльського світа (від назви структури в Каркінітському прогині північно-західного шельфу Чорного моря) виділяється вперше. Стратотип – розріз св. Сельського-40 в інтервалі глибин 1702-2600 м, встановлений за літобіостратиграфічними даними та ГДС (рис. 13). Розповсюджена в ме-

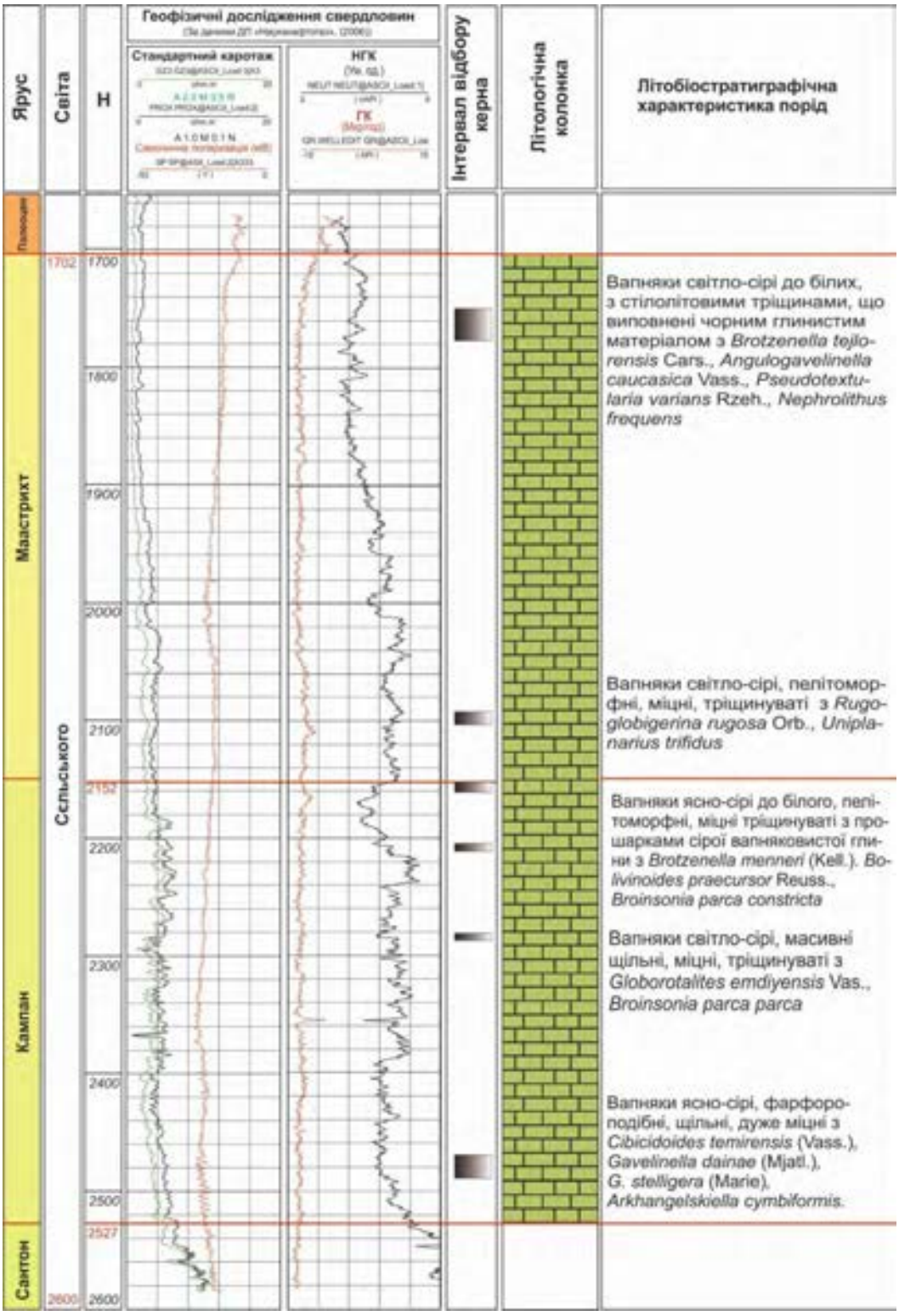


Рис. 13. Стратотип сєльського світи / Fig. 13. Stratotype of the Selskogo Formation

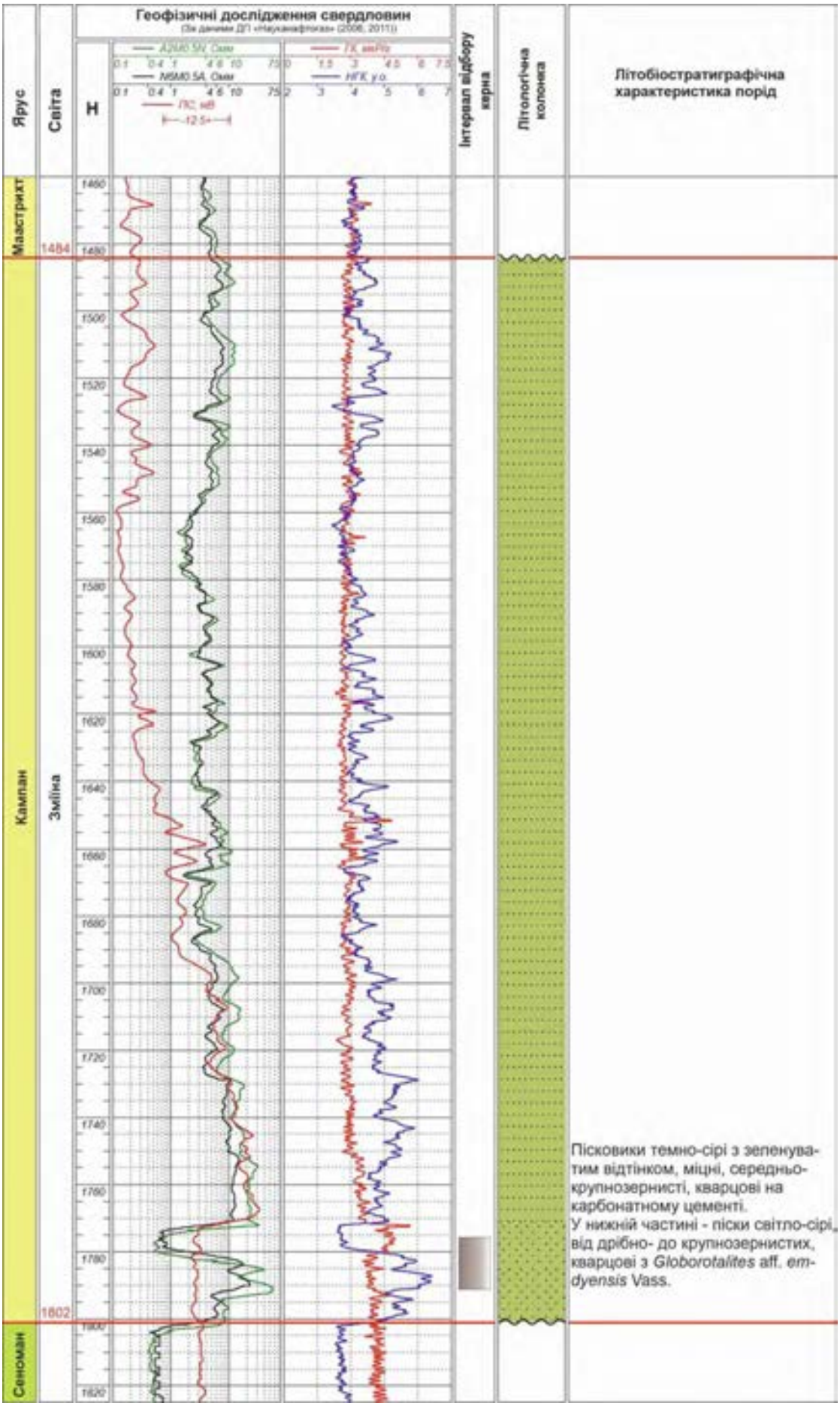


Рис. 14. Стратотип зміїної світи / Fig. 14. Stratotype of the Smiina Formation

жах Каркінітського прогину, Крайового уступу, Каламітського валу та Південноукраїнської моноклінаді. Представлена перешаруванням вапняків світло-сірих до білих, пелітоморфних, слабоглинистих з органічними рештками та прошарками вапняків пітонелових чи форамініферових, мергелів глинистих та глин вапняковистих. Залягає зі стратиграфічним перериваом на відкладах рифтової та безіменної світ сеноману, товщі пісковиків, андезітових порфіритів та вапняків чи мирнівської світи турон-сантонського віку. Перекривається з перериваом чи без перериву палеоценовими чи більш молодими. Відрізняється від підстилаючих та перекриваючих відкладів літологічним складом порід та мінеральним складом карбонатних утворень. Границі світи чітко фіксуються на електрокаротажних діаграмах та за іншими видами каротажу. Товщина відкладів до 970 м. Сєльського світа в межах північно-західного шельфу Чорного моря включає відклади штормової та штильової світ [3], встановлених раніше, тому останні пропонується скасувати. Об'єднує середню та верхню частину товщі пісковиків та пісків, верхню частину товщі вапняків з прошарками глин, верхи середньої частини та верхню частину товщі пелітоморфних вапняків, верхи середньої підтовщі та верхню підтовщу каркінітської товщи та верхи середньої частини і верхню частину товщі пісковиків, діабазових порфіритів та вапняків [2]. Датована пізнім сантоном за *Gavelinella stelligera* (Marie), кампаном за форамініферами *Gavelinella dainae* (Mjatl.), *Cibicidoides temirensis* (Vass.), *Brotzenella monterelensis* (Marie), *B. menneri* (Kell.), *Globotruncanita elevata* (Brotzen), *Bolivinoides decoratus* (Jones.), *Bolivina incrassata* (Rss.), *Globorotalites emdyensis* (Vass.) та нанопланктоном: *Arkhangelskiella cymbiformis*, *Broinsonia parca parca*, *B. parca constricta* та маастрихтом за форамініферами: *Globotruncanita stuarti* (Lapp.), *Cibicidoides bembix* (Marss), *Globotruncana contusa* (Cushman) та нанопланктоном: *Nephrolithus frequens* [2, 12, 13, 20].

Зміїна світа (від назви о. Зміїний на північно-західному шельфі Чорного моря) [3]. Стратотип – розріз св. Безіменна-2 в інтервалі глибин 1110-1802 м, встановлений за літобіостратиграфічними даними та ГДС (рис. 14). Розповсюджена в межах Губкінсько-Кілійсько-Зміїної зони підняттів. Складена пісковиками темно-сірими, середньо-крупнозернистими, кварцовими та пісками світло-сірими, різнозернистими кварцовими. Залягає зі стратиграфічним перериваом на утвореннях безіменної світи середнього-верхнього сеноману, перекривається з перериваом відкладами палеоцену. Границі світи чітко фіксуються на електрокаротажних діаграмах та за іншими видами каротажу. Товщина відкладів до 700 м. Включає середню частину товщи пісковиків та пісків [2]. Датована кампаном за форамініферами: *Globotruncana morozovae* Vass., *Globorotalites emdyensis* Vass. [2, 13].

Висновки. За комплексом методів у розрізі північно-західного шельфу Чорного моря виділено світи: семихатківська, партизанська, рифтова, гамбурцевська, безіменна та корніловська для сеноманських відкладів; мирнівська, борисівська, – турон-коньякських; сєльського, борисівська, федоровська, нижньодніпровська та північноарабатська – сантонських; сєльського та зміїна – кампанських та сєльського – маастрихтських.

Товща пісковиків, андезитових порфіритів та вапняків, що характеризує турон-сантонські відклади Іллічівської площі залишається без змін [2].

Запропоновані місцеві стратиграфічні підрозділи увійдуть до нової стратиграфічної схеми крейдових відкладів північно-західного шельфу Чорного моря та Пояснювальної записки до неї.

Подяка. Дослідження проведено в рамках фундаментальних досліджень Інституту геологічних наук НАН України за держбюджетною тематикою ІГН НАН України «Біостратиграфія мезо-кайнозойських відкладів нафтогазоносних регіонів України як фундаментальна базова основа системного забезпечення геологічних робіт» (№ держреєстрації 0122U001604).

Список використаних джерел

1. *Іщенко Ігор, Якушин Леонід (2025). До питання про місцеві стратиграфічні підрозділи крейдових відкладів українського сектора північно-західного шельфу Чорного моря. Стаття 1. Нижня крейда. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (62), 50-58. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-03*
2. *Гожик, П. Ф. (ред.) (2013). Стратиграфія верхнього протерозою та фанерозою України. Т. 1. Стратиграфія верхнього протерозою, палеозою та мезозою України. Київ: Логос.*
3. *Ищенко, И. И., Якушин, Л. Н. (2015). Местные стратиграфические подразделения меловых отложений северо-западного шельфа Черного моря. Проблеми нафтогазової промисловості, (11-12), 85-98.*
4. *Іщенко, І. І., Лещух, Р. Й., Якушин, Л. М. (2016). Стратиграфія крейдових відкладів Рівнинного Криму. Стаття 2. Верхня крейда. Геологічний журнал, (4), 7-18.*
5. *Якушин Леонід. (2023). Пізньокрейдовий морський басейн платформної України (морфометрія, етапність розвитку, літологія та стратиграфія осадових утворень). Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», (58), 122-133. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-10*

6. *Якушин, Л. М., Супрун, І. С., Клименко, Ю. В., Доротяк Ю. Б., Веклич, О. Д. (2023). Стратиграфія верхньокрейдово-палеоценових відкладів Кілійсько-Зміїного піднятття північно-західного шельфу Чорного моря. Геолого-мінералогічний вісник Криворізького національного університету, 23 (1), 97-113. https://doi.org/10.31721/2306-5443-2023-49-1-97-121*
7. *Хрящевская, О. И., Стовба, С. Н., Стифенсон, Р. А. (2007). Одномерное моделирование истории тектонического погружения Черного (северо-западный шельф) и Азовского морей в мелу-неогене. Геофізичний журнал, 29 (5), 28-49.*
8. *Stovba, S.M., Popadyuk, I.V., Khriachtchevskaia, O.I., Fenota, P.O. (2017). Crimea and Ukrainian Black Sea: the origin, tectonics and evolution. Abstracts of EAGE conference Geoinformatics, Kiev (pp. 577-581). https://doi.org/10.3997/2214-4609.201701798*
9. *Stovba, S. M., Popadyuk, I. V., Fenota, P. O., Khriachtchevskaia, O. I. (2020). Geological structure and tectonic evolution of the Ukrainian sector of the Black Sea. Геофізичний журнал, 42 (5), 53-106. https://doi.org/10.10.24028 / gzh. 0203-3100.v42i5.2020.215072*
10. *Стовба, С., Стіфенсон, Р., Тищенко, А., Фенота, П., Венгрович, Д., Мазур, С. (2023). Історія геологічного розвитку українського сектора Чорного моря із середини ранньої крейди до початку пізнього міоцену. Геофізичний журнал, 45 (3), 3-49. https://doi.org/10.24028/gj.v45i3.282411*
11. *Волошина, А. М., Орлова-Турчина, Г. А. (1973). Литолого-стратиграфическая характеристика разрезов параметрических скважин Северного Причерноморья. В кн.: «Новые данные о геологическом строении и нефтегазоносности юга УССР по материалам региональных геолого-геофизических работ». Львов, Укр-НИГРИ, 20-49.*
12. *Тесленко, Ю. В. (ред.). (1984). Геология шельфа УССР. Стратиграфия (шельф и побережья Чёрного моря). Київ: Наук. думка.*
13. *Гожик, П. Ф., Маслун, Н. В., Плотнікова, Л. Ф., Іванік, М. М., Якушин Л. М., Іщенко, І. І. (2006). Стратиграфія мезокайнозойських відкладів північно-західного шельфу Чорного моря. Київ: Логос.*
14. *Іщенко, І. І. (2015). Стратиграфія крейдових відкладів Північного Причорномор'я. Статья 2. Верхня крейда. Палеонтологічний збірник, (47), 105-119.*
15. *Богаєць, О. Т. (1965). Нові дані про верхньокрейдові відклади Присивашшя та суміжних районів. Геологічний журнал, 25 (2), 44-52.*
16. *Плотнікова, Л. Ф., Липник, О. С. (1968). Про стратиграфію нижньокрейдових відкладів Західного Причорномор'я (у межиріччі Дністер-Тилігул). Доповіді АН УРСР, Сер. Б: Геологія, геофізика, хімія та біологія, (10), 892-895.*
17. *Плотникова, Л. Ф., Геворкьян, В. Х., Липник, Е. С. 1968. К вопросу о границе между альбскими и сеноманскими отложениями западного Причерноморья. Доклады АН СССР, 183 (6), 1396-1399.*
18. *Шевчук, О., Пустовойтова, Д. (2021). Стратифікація крейдових відкладів розрізу свердловини № 29 – Західно-Октябрської (Каркінітсько-Північнокримський прогин) за палінологічними даними. Вісник Київського національного університету ім. Т. Шевченка, Геологія, 3 (94), 27-36. http://doi.org/10.17721/1728–2713.94.03*
19. *Плотнікова, Л. Ф., Якушин, Л. М., Іщенко, І. І. (2006). Нові дані про стратиграфію сеноманських відкладів північно-західного шельфу Чорного моря. Сучасні напрямки Української геологічної науки: Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України. Київ, 249-254.*
20. *Шумник, А. В. (2001). Біостратиграфія верхньокрейдових відкладів північно-західного шельфу Чорного моря і кримського континентального схилу за нанофосіліями. Геологічний журнал, (3). 96-105.*
21. *Горбенко, В. Ф. (1953). К вопросу о стратиграфии меловых отложений северо-восточного крыла Причерноморской впадины. Доклады АН СССР, 93 (1), 135-138.*
22. *Зелінська, В. О., Баранова, Н. М. (1963). Нові дані про палеогенові та межуючи з ними відклади Середнього Побужжя. Геологічний журнал, 23 (6), 74-79.*
23. *Богаец, А. Т., Проснякова, Л. В., Самарская, Е. В. (1972). Новые данные о верхнемеловых отложениях центральной и западной частей Равнинного Крыма. В кн.: «Новые данные по геологии и палеогеографии УССР». Киев.*

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу
Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

To the question of local stratigraphic subdivisions of Cretaceous sediments of the Ukrainian sector of the northwestern shelf of the Black Sea. Article 2. Upper cretaceous

Ihor Ishchenko [1]
DSc (Geology), Chief Specialist of the Regional Geological Research Department
[1] Kyiv Branch of UkrNDIGas, Kyiv, Ukraine;
Leonid Yakushyn [2]
DSc (Geology), Associate Professor, Senior Researcher
of the Department of Stratigraphy and Paleontology of Mesozoic sediments,
[2] Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Introduction. Upper Cretaceous deposits are widespread on the northwestern shelf of the Black Sea. They were discovered by drilling 35 wells on 18 areas and are considered promising for hydrocarbons. In these deposits, the Shmidtivske (Maastrichtian) gas field was discovered, and non-industrial gas inflows were observed in the Golitsynske and Odeska fields, in the Karkinitska, Flangova and Shtileva areas, as well as numerous oil and gas shows. The success of further geological prospecting and exploration works depends on a reliable stratigraphic framework of sedimentary strata promising for hydrocarbons.

Materials and methods. We analyzed the drilling materials of 35 deep wells that exposed Upper Cretaceous sediments of the northwestern shelf of the Black Sea and 14 wells of the adjacent land, the latest seismic data and the results of previous geological and geophysical studies in the region, our own developments and generalizations, as well as information on the geological structure of the study area obtained from the reports on the implementation of research work on geological study of the subsoil, which are stored in the State Research and Production Enterprise "Geoinform of Ukraine". The reference wells were selected as those whose sections were the most informative for stratigraphic constructions based on a set of geological factors (paleontological determinations of fossil fauna groups to establish the relative geological age of rocks, lithological description of stone material, geophysical surveys of wells, etc. To distinguish local stratigraphic units in the Cenomanian, Turonian, Coniacian and Santonian sediments, we used the sections of wells located on the adjacent land, namely: well Myrnivska-1, well Krasnoperekopska-2, well Henicheska-5 and well Borysivska-3. They characterize the same conditions of sedimentation of the marine basin, respectively, during each of the listed ages within the South Ukrainian monocline. Main research methods: bio-lithostratigraphic, lithological and geophysical.

Results. For this purpose, a revision of the local stratigraphic units of the Upper Cretaceous deposits of the Ukrainian sector of the northwestern shelf of the Black Sea was carried out using a set of methods on a geophysical basis (logging), taking into account the results of regional seismic studies, paleontological determinations of the geological age of rocks, literary and stock materials in the Cretaceous section of the northwestern shelf Black Sea. These stratons were included in the stratigraphic scheme of 2013, as well as those highlighted by the authors of the article in 2015. Based on the results of the research, local stratigraphic subdivisions of Formations rank were distinguished: Semyhatkivska, Partizanska, Ryftova, Hamburtsevska, Bezimenna and Kornilovska for Cenomanian deposits; Myrnivska, Borysivska – Turonian-Coniacian deposits; Selskogo, Borysivska, Fedorovska, Nyzhnodniprovska and Pivnichnoarabatska – Santonian deposits; Selskogo and Zmiina – Campanian deposits; Selskogo – Maastrichtian deposits. Turonian-Santonian sediments, represented by andesite and diabase porphyrites with layers of sandstones and found in the well Illichivska-2 well in the depth interval of 1200-1745 m, are distinguished as part of a layer of sandstones, diabase porphyrites and limestones according to [2].

Conclusions. The proposed stratons will be included in the new stratigraphic scheme of the Cretaceous deposits of the northwestern shelf of the Black Sea.

Keywords*: stratigraphy, paleontology, lithology, logging, formation, Upper Cretaceous sediments, well, northwestern shelf of the Black Sea.*

References

1. *Ishchenko Ihor, Yakushyn Leonid (2025). To the question of local stratigraphic subdivisions of Cretaceous sediments of the Ukrainian sector of the northwestern shelf of the Black Sea. Article 1. Lower cretaceous. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (62), 50-58. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-03 [in Ukrainian].*
2. *Gozhyk, P. F. (Ed.). (2013). Stratigraphy of the Upper Proterozoic and Phanerozoic of Ukraine. Vol. 1. Stratigraphy of the Upper Proterozoic, Paleozoic and Mesozoic of Ukraine. Kyiv: Logos [in Ukrainian].*
3. *Ishchenko, I. I., Yakushin, L. M. (2015). Local stratigraphic subdivisions of Cretaceous sediments of the northwestern Black Sea shelf. Problems of the oil and gas industry, (11-12), 85-98.*
4. *Ishchenko, I. I., Leshchukh, R. I., Yakushin, L. M. (2016). Stratigraphy of Cretaceous deposits of the Plain Crimea. Article 2. Upper Cretaceous. Geological Journal, (4), 7-18 [in Ukrainian].*
5. *Yakushyn Leonid (2023). The late Cretaceous marine basin of platform Ukraine (morphometry, stages of development, lithology and stratigraphy of sedimentary formations). Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (58), 122-133. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-10 [in Ukrainian].*

6. *Yakushyn, L. M., Suprun, I. S., Klymenko, Y. V., Dorotiak, Y. B., Veklych, O. D. (2023). Stratigraphy of the Cretaceous-Paleocene deposits of the Kiliya–Zmiine Uplift of the northwestern shelf of the Black Sea. Geological and Mineralogical Bulletin of Kryvyi Rih National University, 49 (1), 97-121 https://doi.org/10.31721/2306-5443-2023-49-1-97-121 [in Ukrainian].*
7. *Khryaschevskaia, O. I., Stovba, S. M., Stefenson, R. A. (2007). One-dimensional modeling of the history of tectonic sinking of the Black Sea (north-western shelf) and the Sea of Azov in the Cretaceous and Neogene. Geophysical Journal, 29 (5), 28-49 [In Russian].*
8. *Stovba, S. M., Popadyuk, I. V., Khriachtchevskaia, O.I., Fenota, P. O. (2017). Crimea and Ukrainian Black Sea: the origin, tectonics and evolution. Abstracts of EAGE conference Geoinformatics, Kiev (pp. 577-581. https://doi.org/10.3997/2214-4609.201701798.*
9. *Stovba S. M., Popadyuk I. V., Fenota P. O., Khriachtchevskaia O. I. (2020). Geological structure and tectonic evolution of the Ukrainian sector of the Black Sea. Geophysical journal, 42 (5). 53-106. https: // doi.org /10.10.24028 / gzh. 3-3100.v42i5.2020.215072.*
10. *Stovba S., Stefenson, R., Tyshchenko, A., Fenota P., Vengrovich, D., Mazur, S. (2023). History of the geological development of the Ukrainian sector of the Black Sea from the middle of the Early Cretaceous to the beginning of the Late Miocene. Geophysical journal, 45 (3), 3-49. https://doi.org/10.24028/gj.v45i3.282411 [in Ukrainian].*
11. *Voloshina, A. M., Orlova-Turchina, G. A. (1973). Lithologo-stratigraphic characterization of sections of parametric wells of the Northern Black Sea coast. In the book: New data on geological structure and oil and gas bearing capacity of the south of the Ukrainian SSR on the materials of regional geological and geophysical works. Lvov: UkrRGEI, 20-49.*
12. *Geology of the shelf of the Ukrainian SSR. (1984). Managing ed. Yu. V. Teslenko. Stratigraphy (shelf and coast of the Black Sea). Kyiv: Naukova Dumka.*
13. *Gozhik, P. F., Maslun, N. V., Plotnikova, L. F., Ivanik, M. M., Yakushin, L. M., Ishchenko, I. I. (2006). Stratigraphy of Mesocainozoic sediments of the northwestern shelf of the Black Sea. Kyiv : Logos [in Ukrainian].*
14. *Ishchenko, I. (2015). Stratigraphy of the Cretaceous deposits of the Northern Black Sea region. Article 2. Upper Cretaceous. Paleontological collection, (47), 105-119 [in Ukrainian].*
15. *Bogayets, A. T. 1965. New data on the Upper Cretaceous deposits of Prysyvash and adjacent areas. Geologìcal Journal, 25 (2), 45-52 [in Ukrainian].*
16. *Plotnikova, L. F., Lipnyk, O. S. (1968). On the stratigraphy of the Lower Cretaceous deposits of the Western Black Sea region (in the Dniester-Tiligul interfluve). Report of the USSR Academy of Sciences, (10), 892-895 [in Ukrainian].*
17. *Plotnikova, L. F., Gevorkian, V. H., Lipnik, E. C. (1968). To the question of the boundary between the Albian and Cenomanian deposits of the western Black Sea region. Report of the USSR Academy of Sciences, 183 (6), 1396-1399.*
18. *Shevchuk, O., Pustovoitova, D. (2021). Stratification of Cretaceous sediments of the section of well No. 29-Zakhidno-Oktyabrska (Karkinitsko-North Crimean Trough) according to palynological data. Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Geology, 3 (94), 27-36 http://doi.org/10.17721/1728–2713.94.03 [in Ukrainian].*
19. *Plotnikova, L. F., Yakushin, L. M., Ishchenko, I. I. (2006). New data on the stratigraphy of Cenomanian sediments of the northwestern shelf of the Black Sea. Modern directions of Ukrainian geological science: collection of scientific works of the IGS NAS of Ukraine, 249-254 [in Ukrainian].*
20. *Shumnyk, A. V. (2001). Biostratigraphy of Upper Cretaceous sediments of the northwestern shelf of the Black Sea and the Crimean continental slope by nannofossil. Geologìcal Journal, (3), 96-105 [in Ukrainian].*
21. *Gorbenko, V. F. (1953). On the stratigraphy of Cretaceous deposits of the northeastern wing of the Black Sea basin. Report AN USSR, 93 (1), 135-138.*
22. *Zelinska, V. O., Baranova, N. M. (1963). New data on the Paleogene and bordering sediments of the Middle Pobuzhye. Geologìcal Journal, 23 (6), 74-79 [in Ukrainian].*
23. *Bogayets, A. T., Prosnyakova, L. V., Samarskaya, E.V. (1967). Paleogeography and history of development of the central and western parts of the flat Crimea in the Albian time. Geology and oil and gas content of the Black Sea depression. Kyiv: Naukova Dumka, 56-62.*

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 4 August 2025
Accepted 21 September 2025

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-05
УДК 551.77+561(557.87)+553.99(477)

Надійшла 1 жовтня 2025 р.
Прийнята 20 листопада 2025 р.

Геологічна будова та біостратиграфічне розчленування бурштиноносних відкладів палеогену ділянки «Древлянська», Житомирське Полісся

Андрій Матвєєв [1]
д. геол. н., професор, кафедра фундаментальної та прикладної геології,
[1] Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна,
e-mail: matveev@karazin.ua, https://orcid.org/0000-0002-2600-6529;
Тетяна Шевченко [2]
к. геол. н., ст. наук. співробітник,
[2] Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна,
e-mail: shetv2@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-7522-9684;
Сергій Мамчур [3]
інженер, [3] Львівський національний університет ім. Івана Франка,
геологічний факультет, Львів, Україна,
e-mail: mamchursv88@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-5828-6924;
Ярослав Курепа [4]
к. геол. н., геолог, [4] ТОВ «ДРІВ ГЕО», Рівне, Україна,
e-mail: ser_lukas@ukr.net, https://orcid.org/0000-0003-4532-7878

Актуальність роботи зумовлена необхідністю застосування сучасних біо-, літостратиграфічних підходів для уточнення віку та палеогеографічних умов осадонагромадження бурштиноносних товщ Житомирського Полісся. Наведено результати комплексного літолого-седиментологічного та палінологічного (органікостінний мікропланктон) дослідження бурштиноносних палеогенових відкладів Барашівського бурштиноносного району в межах ділянки геологічного вивчення «Древлянська» (околиці с. Гулянка Житомирської області). Проведено розчленування палеогенових відкладів (за стратиграфічною схемою 2015 р.). У складі палеогенового розрізу виділені відклади київського та обухівського регіоярусів, які відображають послідовні етапи трансгресивно-регресивної еволюції епіконтинентального моря. Київський регіоярус представлений *товщею безкарбонатних алевритів і пісків*, яку характеризують комплекс з *Rhombodinium porosum*, *Enneadocysta multicornuta*, *Areosphaeridium diktyoplokum* зонального інтервалу DP10 бартону біозональної схеми А.С. Андрєєвої-Григорович (1991). Обґрунтовано приуроченість бурштиноносних відкладів до верхньоеоценового (обухівського) інтервалу (комплекс зонального інтервалу DP11 приабону; диноцистовий комплекс з *Rhombodinium perforatum+Thalassiphora reticulata*). Обухівський регіоярус представлений *товщею безкарбонатних пісків*, яка має тричленну будову. Виявлені закономірності розподілу бурштину в межах окремих седиментаційних пачок цієї товщі. Встановлено, що максимуми накопичення бурштину приходяться на початок та кінець обухівського трансгресивно-регресивного ритму, що пов'язано з максимальними значеннями ерозії бурштинпродукуючих товщ. Палінофаціальний аналіз свідчить, що накопичення бурштину відбувалося в умовах дрібноархіпелагового теплого мілководдя епіконтинентального моря в зоні утворення дельти невеликої річки. Виявлена подібність комплексів органікостінного мікропланктону у відкладах ділянок «Древлянська» та «Правобережна», що засвідчує близькі палеоекологічні умови їх формування й забезпечує латерально-стратиграфічну кореляцію відкладів київського та обухівського регіоярусів у межах Житомирського Полісся та в цілому в Українському Поліссі. Отримані результати уточнюють стратиграфічну позицію бурштиноносних відкладів Північної України та мають значення для побудови прогнозних моделей бурштинонакопичення, що сприяє оптимізації пошуково-розвідувальних робіт у межах Барашівського бурштиноносного району та суміжних територій.

Ключові слова: *органікостінний мікропланктон*, *київський регіоярус*, *обухівський регіоярус*, *стратиграфія*, *палеогеографія*, *Барашівський бурштиноносний район*, *Український щит*, *Північна Україна.*

Як цитувати: Матвєєв Андрій, Тетяна Шевченко, Мамчур Сергій, Курепа Ярослав (2025). Геологічна будова та біостратиграфічне розчленування бурштиноносних відкладів палеогену ділянки «Древлянська», Житомирське Полісся. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*, (63), 71-83. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-05

In cites: Matveev Andriy, Shevchenko Tetiana, Mamchur Serhii, Kurepa Yaroslav (2025). The geological structure and biostratigraphic division of amber-bearing Paleogene deposits of the «Drevlianska» site, Zhytomyr Polissia. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 71-83. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-05 [in Ukrainian]

Вступ. Бурштинові родовища України приурочені до північної частини Українського щита (Рівненське та Житомирське Полісся) і пов'язані з піщано-глинистими відкладами палеогенового віку. Відомо, що формування бурштину відбувалося у прибережно-морських умовах, які поєднувалися з давніми річковими системами [2, 9, 16 та ін.]. У цих середовищах (прибережно-континентальних відкладах) смолисті продукти деревних рослин (живиця) поступово перетворювалися на бурштин, який переносився водними потоками й акумулювався в окремих стратиграфічних горизонтах. Промислові поклади бурштину в Рівненському Поліссі пов'язані в основ-

© Матвєєв Андрій, Тетяна Шевченко, Мамчур Сергій, Курепа Ярослав, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

ному з межигірськими відкладами олігоцену [4, 10, 14, 15, 17 та ін.] в Житомирському Поліссі приурочені до обухівських відкладів верхнього еоцену [6, 14-16].

Протягом тривалого часу багато дослідників приділяли увагу вивченню різних аспектів бурштинової тематики півночі України: вивчалися інклюзи для реконструкції давніх екосистем [21, 23 та ін.], стратифікація бурштиноносних відкладів [Стотланд в роботі [12], 13], їх регіональне районування [4, 5, 9-11, 17 та ін.], оцінка потенціалу окремих територій (ділянок) для знаходження покладів. Саме визначення віку бурштиноносних товщ та встановлення послідовності їх накопичення мають вирішальне значення для реконструкції умов формування родовищ бурштину. Однак попри значний обсяг накопичених даних, низка питань, зокрема уточнення стратиграфічного інтервалу формування бурштину, палеогеографічні реконструкції та визначення критеріїв прогнозування нових покладів, залишається дискусійною. В цьому і полягає актуальність теми, що зумовлена не лише науковим інтересом, але й практичними потребами, адже бурштин є важливою корисною копалиною, його раціональне видобування та пошук нових родовищ вимагають науково обґрунтованих підходів.

Метою проведеного дослідження є вивчення будови осадового чохла, його стратифікації та палеогеографічної обстановки осадконакопичення в межах Барашівського бурштиноносного району (ББР) на прикладі ділянки геологічного вивчення «Древлянська» на основі аналізу палінофацій та літологічного складу відкладів для уточнення та деталізації уявлень про розподіл та оконтурювання в них родовищ бурштину.

Аналіз попередніх публікацій. На сьогодні відсутні спеціалізовані наукові публікації, присвячені детальному літолого-стратиграфічному та біостратиграфічному вивченню бурштиноносних відкладів околиць с. Гулянка Житомирської області, де розташована досліджувана нами ділянка (рис. 1). Наявні відомості ґрунтуються переважно на матеріалах виробничих геологічних звітів [12 та ін.] і даних, отриманих під час досліджень суміжних територій [4, 5, 12, 14-17]. Зокрема, у межах пошукових робіт на бурштин, що виконувалися підприємством «Західкварцсамоцвіти» наприкінці 1980-х років, було проведено палінологічне датування відкладів ББР на ділянках, розташованих східніше та південніше від досліджуваної нами території. О.Б. Стотландом виділено п’ять різновікових комплексів мікрофітофосилій, що дало змогу ідентифікувати відклади, які за сучасними уявленнями відповідають київському та обухівському регіоярусам (за диноцистами, пилком і спорами), берецькому та новопетрівському регіоярусам (за пилком і спорами), а також четвертинним відкладами (за пилком і спорами) (О.Б. Стотланд в роботі [12]).

Водночас дослідження, що проводились в попередні роки, мали переважно виробничий характер та не були спрямовані на аналіз палінофацій і їхнього зв’язку з літологічною будовою бурштиноносних товщ у межах окремих локальних ділянок. Деталізація стратифікації та реконструкція палеогеографічних умов осадонакопичення для району с. Гулянка залишаються недостатньо опрацьованими.

Матеріал та методи. Матеріал, на якому ґрунтується стаття, зібрано авторами під час проведення геологорозвідувальних робіт на площі «Древлянська» ББР (рис. 1, 2), які виконувалися товариством «ДРІВ ГЕО» у 2019–2022 рр. (С. Мамчур, А. Матвєєв, Я. Курепа), із залученнями наукового супроводу щодо біостратиграфічного розчленування та палеогеографічних реконструкцій Інституту геологічних наук НАН України (Т.В. Шевченко).

Загалом літологічний аналіз виконано для 154 гірських виробок (свердловини, шурфи, стінки кар’єрів), закладених в межах ділянки. Колекція літологічних зразків і вся супровідна геологічна документація до них зберігаються в ТОВ «ДРІВ ГЕО» (м. Рівне).

Палінологічний аналіз проведено за керновим матеріалом та зі стінок кар’єрів 17 гірничих виробок, що в комплексі дало змогу розчленувати відклади на стратони стратиграфічної схеми Північної України [3]. Зразки на палінологічний аналіз оброблялись у мікропалеонтологічній лабораторії Інституту геологічних наук НАН України за методикою із залученням пірофосфату натрію ($Na_4P_2O_7$), концентрованої (40%) фтористоводневої кислоти (HF) та просіюванням крізь 15-мікронне сито. Збереженість вилучених паліноморф (диноцисти, акритархи, зелені водорості, «палінофорамініфери», пилок наземних рослин, є різною: від гарної до помірно задовільної; кількісний склад мацератів також різний: від якісно багатих до збіднених. Всі мацерати також наповнені рослинним дебрісом (уламками)), темноколірні та напівпрозорі фітокласти (рис. 3). Вивчення мікрофосилій проводилось в тимчасових препаратах у водному середовищі за допомогою мікроскопів PZO-Warszawa та Leica при збільшенні ×200-×800, фотографування – фотокамери Nikon Coolpix 7900 та Leica Flexacam i5. Номенклатура диноцист згідно з DINOFLAJ3 (2017) та PALSYS (2023); для Wetzeliellaceae відповідно до DINOFLAJ2 (2008). Класифікація палінофаціальних компонентів – за роботами [20, 23]. Колекція палінологічних препаратів з ділянки «Древлянська» зберігається у відділі страти-

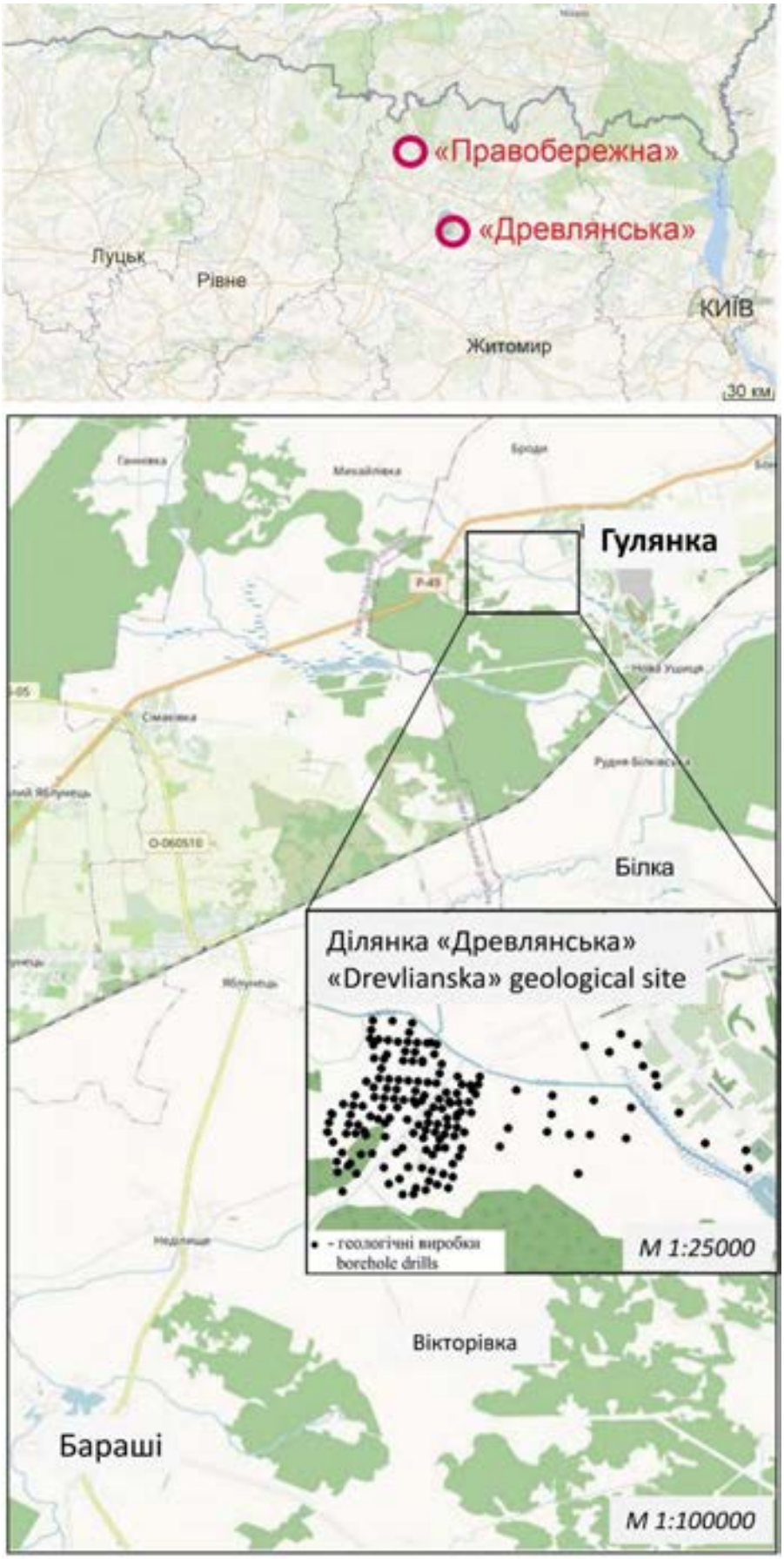


Рис. 1. Місцеположення та карта фактичного матеріалу ділянки геологічного вивчення «Древлянська» (Барашівський бурштиноносний район) /
Fig. 1. Location and factual data map of the «Drevlianska» geological site (Barashi amber-bearing region)

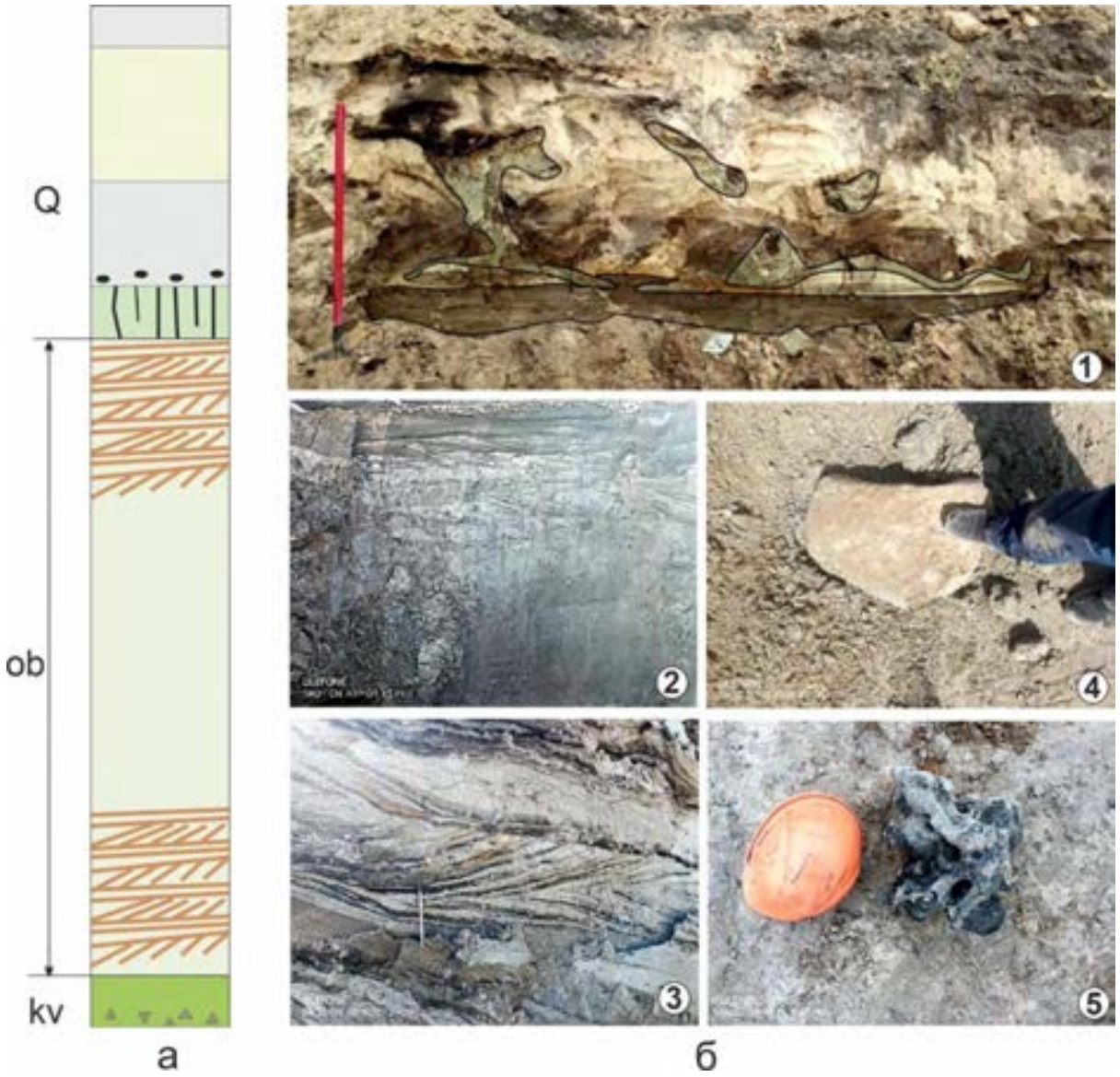


Рис. 2. Геологічна будова та характерні особливості осадового розрізу ділянки «Древлянська»: а: загальна будова осадового розрізу вивченої ділянки (київські (kv), обухівські (ob) та четвертинні (Q) відклади); тричленна будова обухівських відкладів із косою шаруватістю в нижній та верхній частинах (ob); б: *1* – гляціальні деформації четвертинних глин; *2* – коса шаруватість верхньої пачки обухівських відкладів (верхнього продуктивного шару); *3* – коса шаруватість нижньої пачки обухівських відкладів (нижнього продуктивного шару); *4* – уламки метаморфічних порід в нижньому продуктивному шарі; *5* –залишки крейдових кременів в київських відкладах /

Fig. 2. Geological structure and characteristic features of the sedimentary section of the «Drevlianska» geological site: a: general structure of the sedimentary section of the studied area (Kyiv (kv), Obukhiv (ob), and Quaternary (Q) deposits); three-member structure of the Obukhiv deposits with cross-bedding in the lower and upper parts of the unit (ob); б: *1* – glacial deformations of Quaternary clays; *2* – cross-bedding of the upper unit of the Obukhiv deposits (upper productive layer); *3* – cross-bedding of the lower unit of the Obukhiv deposits (lower productive layer); *4* – fragments of metamorphic rocks in the lower productive layer; *5* – remains of Cretaceous flints within the Kyiv deposits.

графії та палеонтології кайнозойських відкладів ІГН НАН України (м. Київ).

Результати та обговорення. У геологічній будові ділянки «Древлянська» за нашими даними беруть участь протерозойські кристалічні утворення, товща палеогенових та четвертинних осадових відкладів.

Відклади кайнозою, і зокрема палеогену, в межах ділянки, як і в цілому в межах Українського щита (УЩ), від розмивів збереглися в його тектонічних пониженнях.

Середній еоцен. Київський регіоярус. Представлений *товщею безкарбонатних алевритів і пісків*, яка залягає у найбільш понижених ділянках кристалічного фундаменту, безпосередньо на кристалічних породах або їх корі вивітрювання. Вона складена пісками кварц-глауконітовими, зеленими, темно-зелено-сірими, темно-сірими з

зеленим відтінком, від дрібно-середньо- до середньо-крупнозернистих, та алевритами піщаними зелено-сірими. Нижня частина товщі містить щебінь та брили кременів темно-сірих, місцями кавернозних, розміром до 0,4 м (рис. 2, фіг. 5). Відклади київського регіоярусу залягають на глибинах від 3,7 до 9,0 м, в середньому – 5,8 м. Їх потужність становить до 3,0 м.

Товща охарактеризована органікостінним мікропланктоном (диноцистами, зеленими водоростями, акритархами), «палінофорамініферами» (багато), пилком вищих рослин (в основному Pinacea), трапляються Scolecodont та уламки черепашок секреційних фораміфер розміром до 70 мікрон.

Диноцисти (комплекс зони DP10 бартону за [1]): *Rhombodinium porosum*, *Thalassiphora fenestrata*, *Thalassiphora delicata*, *Thalassiphora pelagica*, *Palaeocystodinium golzowense*, *Achomosphaera ramulifera / Spiniferites* spp. (багато), *Lentinia serrata*, *Lentinia*? *wetzelii*, *Phthanoperidinium comatum*, *Phthanoperidinium geminatum*, *Phthanoperidinium comatum*, *Phthanoperidinium* spp., *Heteraulacacysta porosa*, *Heteraulacacysta leptalea*, *Heteraulacacysta campanula*, *Dinopterygium cladoides* sensu Morgenroth, 1966, *Deflandrea phosphoritica*, *Charlesdowniea clathrata*, *Charlesdowniea coleothrypta*, *Corrudinium incompositum*, *Microdinium ornatum*, *Cordosphaeridium cantharellus*, *Glaphyrocysta ordinata*, *Glaphyrocysta semitecta*, *Wetzeliella echinulata*, *Wilsonidium echinosuturatum*, *Homotryblium abbreviatum*, *Homotryblium tenuispinosum*, *Homotryblium floripes*, *Dapsilidinium? simplex*, *Cordosphaeridium gracile*, *Enneadocysta arcuata*, *Enneadocysta multicornuta*, *Areosphaeridium diktyoplokum*, *Operculodinium* sp., *Lingulodinium machaerophorum*, *Deflandrea phosphoritica*, *Selenopemphix nephroides*, *Samlandia chlamydophora*, *Tectatodinium pellitum*, *Pentadinium laticinctum*, *Hystrichokolpoma rigaudiae*, *Fibrocysta* sp., *Hystrichostrogylon* sp. та ін.

Зелені водорості: *Cymatiosphaera bujakii, Cymatiosphaera radiata*, *Palambages morulosa*, *Pediastrum boryanum*, *Tasmanites concinnus*, *Botryococcus braunii*, *Pterospermella australiense* та ін.

Акритархи: *Paralecaniella indentata*, *Micrhystridium stellatum*, *Cyclopsiella granosa, Pterospermella microptera*, *Pauicilobimorpha triradiata*, *Cyclopsiella elliptica* та ін.

Верхній еоцен. Обухівський регіоярус. Без помітних ознак ерозійної перерви, але з чіткою межею, вираженою у зміні кольору і гранулометричного складу, на товщі київського регіоярусу залягає *товща пісків безкарбонатних* обухівського регіоярусу. Її складають піски кварцові з зернами глауконіту, переважно дрібно-середньозернисті, алевритисті. Загальний колір порід сіро-зелений та світло-жовто-сірий, часто з буроватим відтінком, обумовленим присутністю пилу бурого вугілля. Місцями прошарки містять його багато і колір стає темно-коричневим.

На значній частині площі ділянки, у повних розрізах, товща має тричленну будову (рис. 2, а). Нижня (0,5 м) та верхня (0,7 м) пачки характеризуються підвищеним вмістом зерен глауконіту та ільменіту, що надає породам світло-зелено-сірого кольору. У цих пачках з'являються у складі уламки лігнітизованої деревини, вуглистий та лігнітизований рослинний дебріс (рис. 3, фіг. 4, 11, 13), поодинокі добре обкатані галька та брили кристалічних порід і уламки бурштину як добре обкатані, так і кутуваті. Текстура цих пачок косошарувата (рис. 2), прошарки підкреслені шаруватою концентрацією алевритового матеріалу з буровугільним пилом (рис. 3, фіг. 13). Падіння прошарків – північно-західне.

Натомість центральна (середня) пачка (0,8-1,5 м) товщі складена більш однорідними кварцовими пісками з поодинокиими зеренами глауконіту та ільменіту, світло-жовто-сірими, в яких іноді зустрічаються дрібні уламки лігнітизованої деревини (рис. 3, фіг. 6, 9) та дрібні добре обкатані уламки бурштину.

У крайових частинах поширення обухівських відкладів, а також над зонами локального підняття фундаменту, в межах вивченої ділянки, їхня будова змінюється: центральна пачка товщі випадає з розрізу, а нижня та верхня пачки зливаються й набувають рис, подібних до підстелюючих відкладів київського регіоярусу. Відклади обухівського регіоярусу залягають на глибинах від 1,1 до 5,8 м, в середньому – 2,9 м. Їх потужність становить до 7,0 м, в середньому – 3,0 м. Абсолютні відмітки покрівлі обухівських відкладів змінюються від 191,4 м до 198,8 м, в середньому – 194,5 м.

Товща пісків безкарбонатних охарактеризована органікостінним мікропланктоном (диноцистами, зеленими водоростями, акритархами), «палінофорамініферами», уламками спікул губок, пилком вищих рослин (в основному Pinacea (багато)).

Диноцисти (комплекс зони DP11 приабону за [1]): *Rhombodinium perforatum*, *Thalassiphora fenestrata*, *Thalassiphora pelagica*, *Saturnodinium pansum*, *Charlesdowniea clathrata*, *Charlesdowniea coleothrypta*, *Spiniferites* spp. / *Achomosphaera* spp., *Phthanoperidinium comatum*, *Areosphaeridium diktyoplokum*, *Glaphyrocysta semitecta*, *Adnatosphaeridium multispinosum*, *Deflandrea phosphoritica*, *Cordosphaeridium funiculatum*, *Cordosphaeridium cantharellus*, *Cordosphaeridium minimum*,

Corrudiniumin incompositum, *Cerebrocysta bartonense*, *Homotryblium floripes*, *Heteraulacacysta porosa*, *Hystrichokolpoma rigaudiae*, *Lentinia serrata*, *Polysphaeridium* sp., *Samlandia chlamydophora*, *Operculodinium microtriainum*, *Operculodinium* sp., *Distatodinium* sp., *Dinopterygium cladoides* sensu Morgenroth, 1966 та ін.

Зелені водорості: *Pediastrum boryanum*, *Tasmanites concinnus*, *Palambages morulosa*, *Planctonites stellarius*, *Botryococcus braunii*, *Cystidiopsis mamellatus*, *Cymatiosphaeropsis punctiferus*, *Cymatiosphaera* sp. (крупна форма; багато), *Pterospermella australiense*, *Pterospermella microptera* та ін.

Акритархи: *Leiosphaeridia* sp. (багато), *Micrhystridium stellatum* (багато), *Ovoidites* sp., *Paralecaniella indentata*, *Cyclopsiella elliptica*, *Cyclopsiella granosa*, сфероморфні акритархи sensu Heilmann-Clausen et Van Simayes, 2005 (багато), *Paucilobimorpha triradiata* (поодиноко).

Перекриваються бурштиноносні відклади в межах ділянки «Древлянська» четвертинними утвореннями, складеними переважно польовошпат-кварцовими середньо- та крупнозернистими пісками, однорідними, місцями тонкокосошаруватими, світло-жовто-сірими. В нижній частині пісків знаходиться відносно тонкий (потужністю 0,2-0,4 м) прошарок світло-зеленосірої глини. Він місцями сильно деформований, із перетисканнями та грибоподібними роздувами (рис. 2, фіг. 1).

Для київських та обухівських відкладів частково проведено форамініферовий аналіз (Т.С. Рябоконь, ІГН НАН України), за результатами якого мікрофауністичні рештки не виявлено.

Реконструкції. Фрагментарність палеогенових відкладів, що притаманна всьому району УЩ, спостерігається і в Житомирському Поліссі. У межах досліджуваної ділянки наявні палеогенові відклади також є неповними та малопотужними (до першого десятку метрів), тому вони відбивають лише фрагмент трансгресивно-регресивної послідовності. Водночас зафіксований у них комплекс літологічних, структурних та (мікро)палеонтологічних ознак дозволяє простежити регіональні закономірності морських трансгресій в межі УЩ в середньо-пізньоеоценовий час.

Київський час. Трансгресія київського моря в крайові частини УЩ на півночі Житомирщини відбувалася поступово, за умов малоактивної хвилеприбійної діяльності. При цьому відбувалося руйнування пізньокрейдових утворень, вимивання їхньої пелітової складової, розчинення карбонатної та накопичення крупних кременів у конденсований шар в нижній частині київських осадів. Кремені зберегли первинну морфологію (форму утворення) і, вочевидь, не зазнавали далекого перенесення, залишаючись у районі свого первинного формування (рис. 2, фіг. 5).

Перевідкладені кремені київських відкладів узгоджуються з іншими проявами перемивання порід верхньої крейди. Зокрема, у складі мікропалеонтологічних комплексів в базальних шарах київських осадків місцями фіксується надзвичайно високий (до 90%) вміст перевідкладених верхньокрейдових диноцист (*Odontochitina operculata*, *Trigonopyxidia ginella*, *Palaeohystrichophora infusorioides*, *Pervosphaeridium pseudhystrichodinium*, *Palaeotetradinium silicorum*, *Cassiculosphaeridia reticulata* та ін. (рис. 3, фіг. 15). Така концентрація, разом із наявністю уламків кременів, відображає єдиний процес інтенсивного руйнування та перемивання крейдових товщ в межах вивченої ділянки під час ранньої фази трансгресії київського моря. Вона також є індикатором положення давньої берегової лінії та фіксує трангресивну поверхню розмиву, що формувалася в зоні активного наступу моря на крейдову сушу. Припускаємо, що берегова лінія на момент заходу київської трансгресії проходила в межах території розвитку крейдових карбонатних товщ туронського віку, які, зазвичай, характеризуються значною кількістю масивних кременів [7, 8]. Пелітова карбонатна складова цих порід на ранньотрансгресивному етапі була повністю розмита (розчинена), тоді як кремені та органічно стійкі мікрофосилії (органікостінний мікропланктон), стійкі до руйнування, легко потрапляли до складу перевідкладених компонентів базальної частини київських відкладів.

Подальше зменшення частки перевідкладених компонентів угору розрізу, присутність звичайних компонентів морського еоценового органікостінного мікропланктону відображає заглиблення басейну, пригасання енергії та перехід до більш рівномірного піщано-пелітового осадонакопичення, характерного для відкритої частини київського моря. При формуванні відкладів помітну роль відігравав теригенний та органічний матеріал, що надходив із суходолу через річкові водотоки до моря, де переносився прибережними течіями. При цьому протягом усього періоду формування київських відкладів до басейну надходив прісноводний і солонуватоводний мікропланктон *Pediastrum*, *Botryococcus*, *Cyclopsiella*, однак його кількість не свідчить про розпріснення вод басейну. Невелика кількість рослинного дебрісу і темноколірних фітокластів у складі палінофації свідчить про віддаленість берегової лінії.

У цілому комплекс мікропланктону відображає умови теплого морського епіконтинентального басейну шельфового типу, що узгоджується

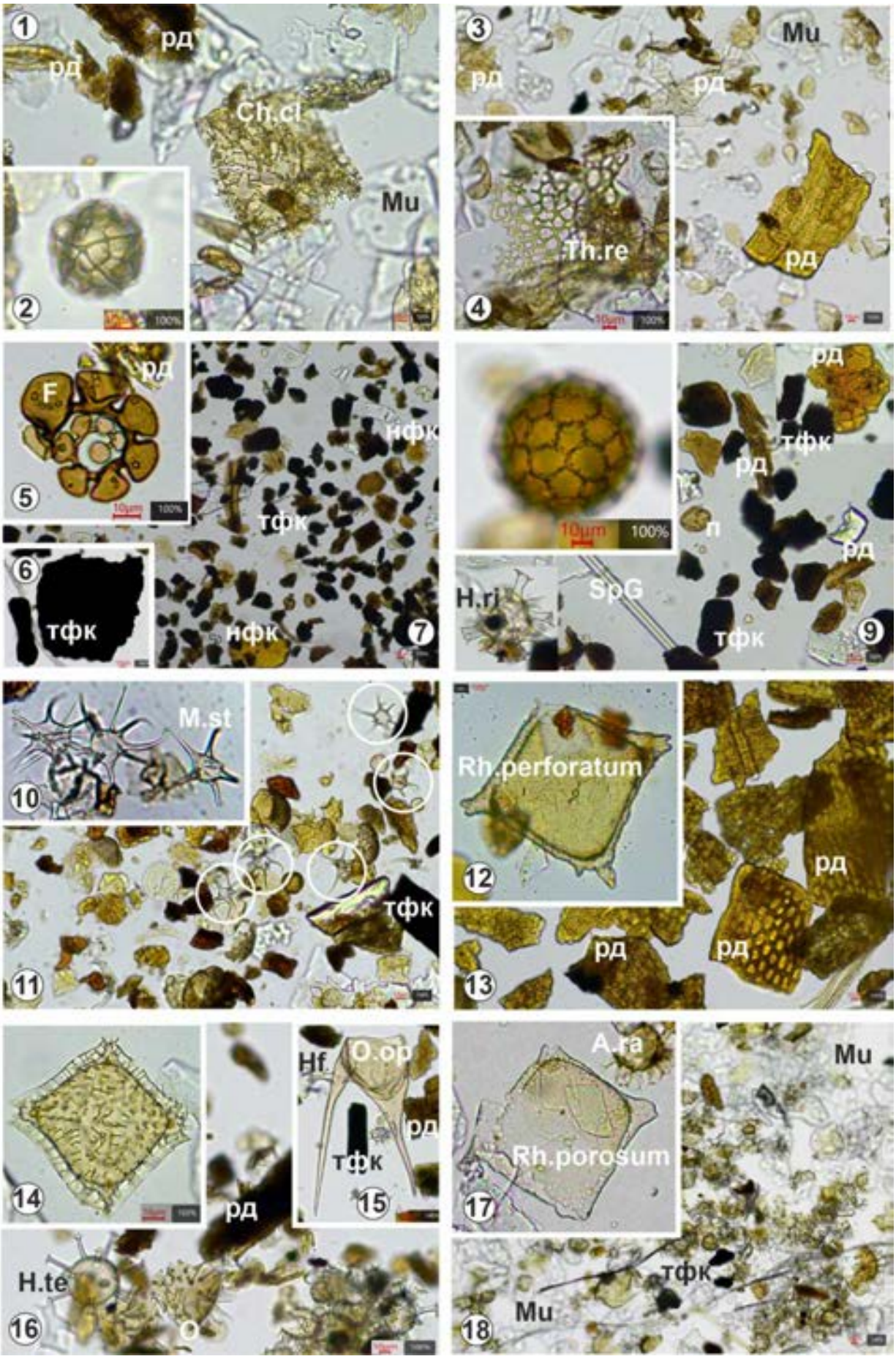


Рис. 3. Палінофації та характерні види органікостінного мікропланктону київського та обухівського часу (ділянка геологічного вивчення «Древлянська», Житомирське Полісся):

Обухівський регіоярус, *товща пісків безкарбонатних. Верхня косошарувата пачка* (*верхній продуктивний шар*)*:*

1-4 – шурф 29, зразок 1, інтервал 3,0-4,0 м, піски кварцові, темно-сірі, дрібно-тонкозернисті: *1* – рослинний дебріс (рд); диноцисти: *Charlesdowniea clathrata* (Ch.cl); мусковіт (Mu); *2* – празинофіти: *Cystidiopsis mamellatus*; *3* – рослинний дебріс (рд); мусковіт (Mu); *4* – диноцисти: *Thalassiphora reticulata*, уривок (Th.re).

Середня пачка (*малопродуктивний шар*)

5-7, *8*, *9* – шурф 29, зразок 2, інтервал 5,2-6,4 м, піски кварцові, коричнево-сірі, середньо-дрібнозернисті: *5* – «палінофорамініфера» (F); рослинний дебріс (рд); *6* – темноколірні непрозорі (чорні) фітокласти (тфк); *7* – напівпрозорі коричневі фітокласти (нфк); темноколірні непрозорі (чорні) фітокласти (тфк); *8* – *Cymatiosphaera* sp. (крупна форма)

9 – рослинний дебріс (рд); темноколірні непрозорі (чорні) фітокласти (тфк); пилок наземних рослин (п); спікули губок (SpG); диноцисти: *Hystrichokolpoma rigaudiae* (*Hr*)

Нижня косошарувата пачка (*нижній продуктивний шар*)

10, *11* – стінка кар'єру, точка відбору 268, зразок 7, інтервал 3,6-4,6 м, піски глауконіт-кварцові, сірозелені, дрібно-середньозернисті: *10* – акритархи: *Micrhystridium stellatum* (Ms); *11* – темноколірні непрозорі (чорні) фітокласти (тфк); в кружечках акритархи: *Micrhystridium stellatum* (акме);

12, *13* – свердловина 7, зразок 1, інтервал 5,0-5,5 м, алеврити глинисті, піщанисті, кварцові з глауконітом, темно-сірі: диноцисти: *Rhombodinium perforatum*; *13* – рослинний дебріс (рд).

Київський регіоярус, *товща безкарбонатних алевритів і пісків*

14, *17*, *18* – шурф 29, зразок 4, інтервал 7,7-8,5 м, піски кварцові з глауконітом, темно-сірі з зеленокоричневим відтінком, дрібно-тонкозернисті: *14* – диноцисти: *Charlesdowniea coleothrypta*; *17* – диноцисти: *Rhombodinium porosum*, *Achomosphaera ramulifera* (A.ra); *18* – темноколірні непрозорі (чорні) фітокласти (тфк); диноцисти: щільне скупчення хоратних гоніулакоїдних цист, які взаємно зчіплюються виростами, утворюючи «кубла»; мусковіт (Mu);

15 – свердловина Г2, зразок 1, інтервал 5,0-7,0 м, піски кварцові з глауконітом, темно-сірі з коричневим відтінком, дрібнозернисті: темноколірні непрозорі (чорні) фітокласти (тфк); рослинний дебріс (рд); диноцисти: *Odontochitina operculata* (O.op) (перевідкладена), *Homotryblium floripes* (Hf);

16 – шурф 13, зразок 1, інтервал 4,5-5,5 м, піски кварцові з зернами глауконіту, темно-сірі з зеленим відтінком, тонко-дрібнозернисті: рослинний дебріс (рд); диноцисти: *Homotryblium tenuispinosum* (H.te) та «кубла» хоратних /

Fig. 3. Palynofacies and characteristic taxa of organic-walled microplankton of the Kyiv and Obukhiv times («Drevlianska» geological site, Zhytomyr Polissia):

Obukhivian Regional Stage, *non-carbonate sand strata. Upper cross-bedded unit* (*upper productive layer*))

1–4 – test pit 29, sample 1, interval 3.0–4.0 m, quartz sands, dark grey, fine- to very fine-grained: *1* – plant debris (рд); dinocysts: *Charlesdowniea clathrata* (Ch.cl); muscovite (Mu); *2* – prasinophytes: *Cystidiopsis mamellatus*; *3* – plant debris (рд); muscovite (Mu); *4* – dinocysts: *Thalassiphora reticulata*, fragment (Th.re).

Middle unit (*low-productivity layer*)

5-7, *8*, *9* – test pit 29, sample 2, interval 5.2–6.4 m, quartz sands, brownish-grey, medium- to fine-grained: *5* – «palynoforaminifera» (F); plant debris (pd); 6 – dark-coloured opaque (black) phytoclasts (тфк); *7* – semi-transparent brown phytoclasts (нфк); dark-coloured opaque (black) phytoclasts (тфк); *8* – *Cymatiosphaera* sp. (large form); *9* – plant debris (рд); dark-coloured opaque (black) phytoclasts (тфк); pollen of terrestrial plants (п); sponge spicules (SpG); dinocysts: *Hystrichokolpoma rigaudiae* (H.ri).

Lower cross-bedded unit (*lower productive layer*);

10, *11* – quarry wall, sampling point 268, sample 7, interval 3.6–4.6 m, glauconite–quartz sands, grey-green, fine- to medium-grained: *10* – acritarchs: *Micrhystridium stellatum* (M.st); *11* – dark-coloured opaque (black) phytoclasts (тфк); in circles acritarchs: *Micrhystridium stellatum* (acme);

12, *13* – borehole 7, sample 1, interval 5.0–5.5 m, clayey sandy siltstones, quartz with glauconite, dark grey: dinocysts: *Rhombodinium perforatum*; 13 – plant debris (рд).

Kyivian Regional Stage, *non-calcareous silts and sands strata*

14, *17*, *18* – test pit 29, sample 4, interval 7.7–8.5 m, quartz sands with glauconite, dark grey with a greenish-brown tint, fine- to very fine-grained: *14* – dinocysts: *Charlesdowniea coleothrypta*; *17* – dinocysts: *Rhombodinium porosum*, *Achomosphaera ramulifera* (A.ra); *18* – dark-coloured opaque (black) phytoclasts (тфк); dinocysts: dense aggregation of chorate gonyaulacoid cysts mutually interlocked by processes (mass); muscovite (Mu);

15 – borehole Г2, sample 1, interval 5.0–7.0 m, quartz sands with glauconite, fine-grained, dark grey with a brownish tint: dark-coloured opaque (black) phytoclasts (тфк); plant debris (рд); dinocysts: *Odontochitina operculata* (O.op) (reworked), *Homotryblium floripes* (Hf);

16 – test pit 13, sample 1, interval 4.5–5.5 m, quartz sands with glauconite grains, dark grey with a greenish tint,very fine- to fine-grained: plant debris (рд); dinocysts: *Homotryblium tenuispinosum* (H.te) and chorate «mass».

з бартонським кліматичним оптимумом [19]. На це вказує широкий розвиток *Microdinium*, *Hystrichokolpoma rigaudiae*, *Homotryblium*, *Wetzeliella*, *Wilsonidium*, *Enneadocysta*, *Areosphaeridium*, *Charlesdowniea*, *Thalassiphora fenestrata*, *Deflandrea heteraphlycta.*

Нормальна морська солоність басейну підтверджується як домінуванням диноцист над акритархами та празинофітовими, присутністю «палінофорамініфер», так і загалом загальним складом диноцист, характерних для нормальноморських середовищ (*Homotryblium*, *Hystrichokolpoma*, *Cordosphaeridium*, *Areosphaeridium*, *Spiniferites*, *Dapsilidinium*).

Помірна глибина та наявність стабільної водної товщі простежуються за присутністю неритично-шельфових форм (*Achomosphaera*, *Spiniferites*, *Enneadocysta*, *Areosphaeridium*, *Cordosphaeridium*, *Thalassiphora*, *Dapsilidinium*, *Hystrichokolpoma*, *Operculodinium*, *Lingulodinium*), невеликої кількості пилку наземних рослин.

Склад комплексу свідчить про сталі гідрологічні зв'язки як із палеобасейнами суміжних територій у межах України, так і з басейнами Західної, Центральної Європи та Північної Атлантики, на що вказує не часта, але стійка присутність *Impagidinium*.

Обухівський час. Обухівські відклади, що збереглися від розмивів у межах ділянки, показують, що їх накопичення відбувалось протягом одного трансгресивно-регресивного ритму в умовах дрібноархіпелагового мілководдя епіконтинентального моря, неподалік від дельти невеликої річки. На особливості седиментації істотно впливали континентальні водотоки та низько підняті острови, з яких надходили значні об'єми теригенного матеріалу (переважно кварцу) та органічних решток (уламки деревини, рослинні залишки, дрібнодисперсний органічний матеріал).

Початок та кінець ритму визначають косоверстуваті відклади нижньої і верхньої пачок товщі обухівських відкладів, збагачені вуглистою речовиною, які утворилися внаслідок зміни/коливань базису ерозії, дрібноритмічної денудації на суходолі та течій між островами, які спричиняли активний перенос і пересортування піщано-алевритового матеріалу, збагаченого теригенною смолистою органікою. Фаза максимуму трансгресивного ритму супроводжується затопленням островів та підвищень, зменшенням інтенсивності надходження, насамперед, дрібних органічних решток та формування відкладів віддаленого прибережного мілководдя. За таких умов сформувалася середня пачка обухівської товщі, коли уламки бурштину майже не постачаються у морський басейн.

У гідрологічному відношенні басейн, у якому формувалася ритмічна обухівська товща, істотно відрізнявся від басейну київського часу. В обухівському басейні відмічається масовий розвиток акритарх і зелених водоростей (домінування акритарх і зелених на цьому рівні відмічає і О.Б. Стотланд (Стотланд в роботі [12]), що свідчить про зменшення глибин та зниження солоності вод. Температура поверхневих вод при цьому залишалася достатньо високою.

Загалом структура палінофації обухівських відкладів ділянки «Древлянська» подібна до такої на ділянці геологічного вивчення «Правобережна», що в околицях с. Замисловичі Житомирської області [16]: основну масу мацерату становлять рослинний дебріс і пилок наземних рослин, переважно Pinaceae, тоді як рештки морських мікроорганізмів мають підлегле значення. Це палеонтологічно свідчить про активний континентальний стік (річки, струмки, тимчасові водотоки) з прилеглого суходолу, островів, що функціонували як «мініконтиненти», вкриті хвойною та іншою рослинністю, у морський басейн.

Четвертинні відклади в межах ділянки представлені флювіогляціальними фаціями (рис. 2, фіг. 1). Порушення первинного залягання глинистих прошарків інтерпретуються як наслідки морозного утворення ін'єкційних горбів.

Стратиграфічні та седиментологічні особливості розподілу бурштину в межах ділянки «Древлянська». Поклади бурштину в межах вивченої ділянки приурочені до обухівських відкладів верхнього еоцену. Досліджена обухівська *товща пісків безкарбонатних* бурштиноносна по всьому розрізу, однак ступінь збагаченості бурштином суттєво варіює між окремими пачками. Найбільша концентрація бурштину зафіксована в нижній косоверстуватій пачці.

На початковому етапі обухівської трансгресії, як відмічалося вище, відбулася активізація інтенсивної ерозії прибережно-континентальних відкладів, зокрема тих, що в обухівський час слугували бурштиноматеринськими. Це зумовило винесення легких уламкових часток у морську систему та їх акумуляцію в прибережних пастках, у тому числі разом із бурштином. Енергія середовища на цьому етапі була достатньою для транспорту уламків, але недостатньою для їх руйнування або надмірного подрібнення, що створило оптимальні умови для збереження фрагментів бурштину середнього й великого розмірів, характерних для нижньої косоверстуватої пачки.

У фазі максимуму трансгресії, коли ерозія бурштинопродукуючих джерел була мінімальною, концентрація бурштину різко зменшувалася. Середня пачка містить лише незначну кількість дрібних уламків бурштину, що відображає

зниження надходження матеріалу з континентальних джерел.

У регресивній фазі, в умовах просування берегової лінії у бік моря, зростала енергія потоків у руслово-берегових зонах і розпочинався новий цикл ерозії бурштиноматеринських відкладів. Це знову створювало умови для надходження бурштину, переважно дрібного та середнього розмірів, який накопичувався у верхній косоверстуватій пачці. Розміри уламків бурштину в цій пачці перевищують аналогічні показники для максимуму трансгресії, однак не досягають максимальних значень, характерних для її початкової стадії.

Висновки. На основі комплексного аналізу літологічних, седиментологічних і палінологічних даних уточнено геологічну будову кайнозойського осадового чохла Барашівського бурштиноносного району в межах околиць с. Гулянка Житомирської області. Встановлено, що в його складі беруть участь відклади середнього та пізнього/верхнього еоцену, представлені київським і обухівським регіоярусами відповідно.

Реконструйовано умови палеогенового осадонакопичення в межах ділянки геологічного вивчення «Древлянська». Отримані результати можуть бути використані як репрезентативна локальна модель для реконструкції послідовності палеогеографічних подій у регіоні та виділення ключових етапів взаємодії берегової зони й осадового басейну. Така модель відображає циклічність осадонакопичення й є інформативною для інтерпретації загальної динаміки морських умов на регіональному рівні.

Встановлені палеогеографічні умови осадконакопичення обухівської товщі безкарбонатних пісків, сформованої в межах теплого дрібноархіпелагового морського епіконтинентального басейну шельфового типу зі зниженою солоністю та помірною глибиною, створювали сприятливі умови для акумуляції, транспортування та збереження бурштину. Доведено, що максимуми його накопичення приурочені до фаз інтенсивної ерозії бурштинопродукуючих товщ, які припадають на початкові та завершальні етапи трансгресивно-регресивних ритмів. Конкретизація просторового положення бурштиноносних товщ може бути використана для прогнозування, пошуків та оконтурювання нових ділянок з підвищеною бурштиноносністю в межах Барашівського бурштиноносного району та суміжних територій.

Дослідження виконувалися в рамках робіт КПКВК 6541030 «Розробка та апробація стратиграфічної моделі осадових басейнів палеогену, неогену та квартеру України» (*державний реєстраційний номер 0122U001698*) *та геологорозвідувальних робіт на бурштин, яке виконує товариство з обмеженою відповідальністю «ДРІВ ГЕО».*

Список використаних джерел

1. *Андреева-Григорович А.С., Запорожец Н.И., Шевченко Т.В., Александрова Г.Н., Васильева О.Н., Яковлева А.И., Стотланд А.Б., Савицкая Н.А. (2011). Атлас диноцист палеогена Украины, России и сопредельных стран. Киев: Наук. думка. 224.*
2. *Богдасаров М.А., Комлев А.А., Криницкая М.В., Нестеровский В.А., Петров Н.П. (2014). Геолого-генетическая модель янтареносных отложений Беларуси и Украины. Вучоныя запіскі, 10(2), 98-109.*
3. *Зосимович В.Ю., Шевченко Т.В. (2015). Палеогенові відклади Північноукраїнської палеоседиментаційної провінції. Зб. наук. праць ІГН НАН України, 8, 68–121. https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2015.146712*
4. *Криницька М.В., Шпирка В.М. (2008). Територіальне районування бурштиновмісних площ України в світлі їх ієрархічного підпорядкування. Український бурштиновий світ. Тези доповідей Другої міжнародної конференції 16-17 жовтня 2008 р. 12-13.*
5. *Мазур М.Д., Біла Т.О., Дроздецький В.В. (2010). Геологічна будова та корисні копалини верхів'я р. Уборть. Звіт про геологічне довивчення території аркуша М-35-Х (Олевськ) масштабу 1:200 000. 259. ПДРГП «Північгеологія». Рівненська ГЕ. Фонди ДП «Українська геологічна компанія».*
6. *Мамчур С., Шпирка В. (2025). Закономірності геологічної будови і бурштиноносності Прип'ятської палеогенової западини. Мінералогічний збірник, 75, 80-88.*
7. *Матвєєв А.В. Колосова І.В. (2015). Вапняний нанопланктон сеноману та турону північно-західного Донбасу. Палеонтологічний зб. 47. 130-134.*
8. *Матвєєв А.В., Колосова І.В., Курепа Я.С., Синєгубка В.В., Шоміна А.Д. (2017). Палеонтологічна характеристика туронських відкладів західного схилу Українського щита. Вестн ХНУ им. В.Н. Каразина. Сер «Геологія. Географія. Екологія». 47. 26-37. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2017-47-03*
9. *Мацуй В.М., Нестеровский В.А. (1995). Янтарь Украины (состояние проблемы), 55.*
10. *Мельничук В.Г., Криницька М.В. (2018). Бурштин Полісся. Довідник. Рівне: НУВГП. 236.*
11. *Науменко У.З., Мацуй В.М. (2020). Карта викопних смол України. Мінеральні ресурси України. 4. 13-17. DOI: https://doi.org/10.31996/mru.2020.4.13-17*
12. *Панченко В.И., Василенко Р.В., Бурлаков В.Н. (1989). Отчет о результатах поисковых работ в пределах Барашивской янтареносной зоны за 1987-1989 гг. ПДРГП «Північгеологія». Рівненська ГЕ. Фонди ДП «Українська геологічна компанія». 295.*

13. *Стратиграфическая схема фанерозойских образований Украины для геологических карт нового поколения (1993). Графические приложения. Таблицы. Киев.*
14. *Шевченко Т.В., Курепа Я.С., Рябоконь Т.С., Зосимович В.Ю. (2021). Новые данные по стратиграфии среднего-верхнего эоцена северо-западного района Украинского щита (Украина). Географические аспекты устойчивого развития регионов: Материалы IV международной научно-практической конференции. Гомель. 275-279.*
15. *Шевченко Т.В., Курепа Я.С., Рябоконь Т.С., Мамчур С.В., Зосимович В.Ю. (2021). Еоценові та олігоценові морські відклади Українського Полісся: нові мікропалеонтологічні дані. Еволюція органічного світу як основа стратиграфії і кореляції фанерозойських відкладів України: Матеріали міжнарод. конф. та XL сесії Українського Палеонтолог. товариства НАН України, присвячених пам'яті акад. НАН України Петра Феодосійовича Гожика. (Київ, 10-12 листопада 2021 р.). 64-65.*
16. *Шевченко Т., Мамчур С., Курепа С., Матвєєв А. (2024). Палеогеографічні умови формування пізньоеоценових відкладів Житомирського Полісся у зв'язку з їх бурштиноносністю (на прикладі ділянки «Правобережна»). Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія». 61. 108-120. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-09*
17. *Яковлєва В.В., Панченко В.П. (2004). Бурштин Західного Полісся та інших регіонів України. Природа Західного Полісся та прилеглих територій: Зб. наук. пр. Луцьк. 23-32.*
18. *Bijl P.K., Brinkhuis H. (2023). An open-access taxonomic and stratigraphic database of organic-walled dinoflagellate cysts, J. Micropalaeontol. 42, 309-314. https://doi.org/10.5194/jm-42-309-2023*
19. *Bohaty S.M., Zachos J.C., Florindo F., Delaney, M.L. (2009). Coupled greenhouse warming and deep-sea acidification in the middle Eocene. Paleoceanography, 24. https://doi.org/10.1029/2008PA001676*
20. *Gedl P. (2013). Eocene dinoflagellate cysts from the Popiele beds at Koniusza (Skole Nappe, Flysch Carpathians, Poland): taxonomy, biostratigraphy, and palaeoenvironmental reconstruction of a marginal marine basin. Studia Geologica Polonica. 135. 197.*
21. *Fedotova Z.A., Perkovsky E.E. (2012). Gall Midges of the Supertribe Stomatosematidi (Diptera, Cecidomyiidae) in the Palaearctic Region, with Descriptions of New Taxa from the Late Eocene Rovno Amber. 2. The Genera Didactylomyia and Rovnodidactylomyia gen. n. Entomological review 92. 5. 565–575. https://doi.org/10.1134/S0013873812050090*
22. *Mendonça Filho J.G., Menezes T.R., Mendonca J.O. (2012). Organic Facies: Palynofacies and Organic Geochemistry Approaches Geochemistry. Geochemistry. Earth and System Processes. 1. 211-245.*
23. *Perkovsky E.E., Zosimovich V.Yu., Vlaskin A.Yu. (2003). Rovno amber fauna: a preliminary report. Acta zoologica cracoviensia. 46. 423-430.*

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу.
Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

The geological structure and biostratigraphic division of amber-bearing Paleogene deposits of the «Drevlianska» site, Zhytomyr Polissia

Andriy Matveev [1]
PhD (Geology), Associate Professor,
Department of Fundamental and Applied Geology,
[1] V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine;
Tetiana Shevchenko [2]
PhD (Geology), Senior Researcher
Department of Stratigraphy and Paleontology of the Cenozoic deposits,
[2] Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine;
Serhii Mamchur [3]
Engineer, Faculty of Geology,
[3] Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine;
Yaroslav Kurepa [4]
PhD (Geology), Geologist, [4] «DRIV GEO» LLP, Rivne, Ukraine

ABSTRACT

Problems Statement and Purpose. The relevance of this study is determined by the need to apply modern bio- and lithostratigraphic methods to clarify the age and paleogeographic conditions of accumulation of amber-bearing strata in Zhytomyr Polissya. This study aims to investigate the structure and stratification of the sedimentary cover, as well as the paleogeographic conditions of sedimentation within the Barashi amber-bearing district. The research is based on an analysis of palynofacies and lithological characteristics of the deposits and seeks to refine existing concepts of amber distribution.

Data and Methods. The material was collected by the authors during field investigations at the «Drevlianska» geological site, which included borehole drilling and the excavation of test pits. In total, 154 workings were examined. The lithological characteristics of the exposed deposits were documented in detail. Micropaleontological and palynofacies analyses were conducted on samples from 17 workings.

Results and Discussion. The sedimentary cover consists of Middle and Upper Eocene sediments, represented by the Kyiv and Obukhiv regional stages, respectively, as well as Quaternary deposits. The Kyivian regional stage consists mainly of non-carbonate siltstones and sands and is characterized by dinocyst assemblages, including *Rhombodinium porosum*, *Enneadocysta multicornuta*, *and Areosphaeridium diktyoplokum*. These assemblages correspond to the Bartonian zonal interval DP10 of the biostratigraphic scheme proposed by A.S. Andreeva-Grigorovich (1991). The transgression of the Kyiv Sea within the study area led to the reworking of the underlying Cretaceous sediments, fragments of which flints and reworked dinocysts, were largely redeposited at the base of the Kyiv sequence.

In general, the composition of the microplankton community (*Microdinium*, *Hystrichokolpoma rigaudiae*, *Homotryblium*, *Wetzeliella*, *Wilsonidium*, *Enneadocysta*, *Areosphaeridium*, *Charlesdowniea*, *Thalassiphora fenestrata*, *Deflandrea heterophlycta*) indicates sedimentation within a warm epicontinental marine shelf basin, which corresponds to the environmental conditions prevailing during the Bartonian climatic optimum.

It is shown that the amber-bearing deposits are confined to the Upper Eocene (Obukhov) interval, which corresponds to the Priabonian zonal interval DP11, and are characterized by a dinocyst assemblage, in which *Rhombodinium perforatum* and *Thalassiphora reticulata* are present. The Obukhiv regional stage is represented by a non-carbonate sandy sequence with a three-membered internal structure. Within this sequence, regular patterns of amber distribution between individual sedimentary units were revealed. It was found that the maximum accumulation of amber occurred during the initial and final phases of the Obukhov transgressive-regressive cycle, which coincided with periods of increased erosion of amber-forming beds.

Palynofacial analysis shows that the accumulation of amber occurred in the conditions of a warm, shallow epicontinental sea, characterized by a small-archipelago location, within the delta zone of a small river system.

The results obtained can be used as a representative local model for reconstructing the sequence of paleogeographic events in the region and for determining the key stages of interaction between the coastal zone and the sedimentary basin.

Keywords*: organic-walled microplankton*, *Kyivian regiostage*, *Obukhivian regiostage*, *stratigraphy*, *paleogeography*, *Barashi amber-bearing region*, *Ukrainian Shield*, *Northern Ukraine.*

References

1. *Andrejeva-Grigorovich A.S., Zaporozhets N.I., Shevchenko T.V. (2011). Atlas of Paleogene Dinocysts of Ukraine, Russia and adjacent countries Naukova Dumka, Kyiv: 224.*
2. *Bogdasarov M.A., Komlev A.A., Krynytska M.V., Nesterovski V.A., Petrov N.P. (2014). The Geological Genetic Model of Amber-Bearing Deposits of Belarus and Ukraine. Scientific Proceeding of Brest University Collection of scientific works, 10(2), 98-109.*

3. *Zosimovich V.Yu., Shevchenko T.V. (2015). Paleogene deposits of the Northern Ukraine paleosedimentary province. Collection of scientific works of the Institute of Geological sciences NAS of Ukraine. 8, 68-121. https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2015.146712 [in Ukrainian].*
4. *Krynytska M.V., Shpyrka V.M. (2008). Territorial zoning of amber-bearing areas of Ukraine in the light of their hierarchical subordination. Ukrainian Amber World: abstracts of the reports of the Second international conference of October 16-17, 2008. 12-13.*
5. *Mazur M.D., Bila T.O., Drozdetsky V.V. et al. (2010). Geologic building and mineral deposits of the head of river Ubort. Report on geologic additional investigation on the territory of M-35-X (Olevsk) sheet, scale 1:200 000. 259. PDRGP «Pivnichgeologiya». Rivne GE. Fund of the State Enterprise «Ukrainian Geological Company» [in Ukrainian]*
6. *Mamchur S., Shpyrka V (2025). Regularities of the geological structure and amber-bearing of the Prypiat Paleogene depression. Mineralogical collection, 75, 80-88 [in Ukrainian].*
7. *Matveyev A.V. Kolosova I.V. (2015). Calcareous nanoplankton of the Cenomanian and Turonian of northwestern Donbass. Paleontological Collection, 47, 130-134 [in Ukrainian].*
8. *Matveyev A.V., Kolosova I.V., Kurepa Ya.S., Sinegubka V.V., Shomina A.D. (2017). Paleontological characteristic of Turonian deposits on the western slope of the Ukrainian shield. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series «Geology. Geography. Ecology», (47). 26-37 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2017-47-03*
9. *Matsui V.M., Nesterovskij V.A. (1995). Amber of Ukraine (state of the problem), 56.*
10. *Melnychuk V.G., Krynytska M.V. (2018). Amber of Polissya. Handbook Rivne: NUVGP, 236. [in Ukrainian].*
11. *Naumenko U., Matsui V. (2020). Map of fossil resins of Ukraine. Mineral resources of Ukraine, 4, 13-17 https://doi.org/10.31996/mru.2020.4.13-17 [in Ukrainian].*
12. *Panchenko V.Y., Vasylenko R.V., Burlakov V.N. (1989). Report on the results of prospecting within the Barashiv amber zone for 1987-1989, 295 [NGRE PO «Zapadkvartssamotsvety», Volodarsk-Volinsky, (VGO, UkrTGF «Tsentrkvartssamotsvety», PO «Zapadkvartssamotsvety») M-35-45, Zhytomyr region, Ukrainian SSR].*
13. *Stratigraphic schemes of the Phanerozoic formations of Ukraine for geological maps the new generation. Graphic applications. Tables. (1993). Kyiv.*
14. *Shevchenko T.V., Kurepa Ya.S., Ryabokon T.S., Zosymovych V.Yu. (2021). New data on the Middle-Upper Eocene stratigraphy of the northwestern region of the Ukrainian Shield (Ukraine). Geographical aspects of sustainable development of regions: Materials of the IV International Scientific and Practical Conference. Gomel, 275-279.*
15. *Shevchenko T.V., Kurepa Ya.S., Ryabokon T.S., Mamchur S.V., Zosymovych V.Yu. (2021). Eocene and Oligocene marine sediments of the Ukrainian Polissia: new micropaleontological data. Evolution of organic world as fundament of stratigraphy and correlation of Phanerozoic of Ukraine: Materials of International scientific conference and XL session of the Ukrainian Paleontological Society of NAS of Ukraine, dedicated to a memory of the Academician of NAS of Ukraine Petro Feodosiiovych Gozhyk (Kyiv, November 10–12, 2021). Kyiv, 64-65. [in Ukrainian].*
16. *Shevchenko T., Mamchur S., Kurepa Ya., Matveyev A. (2024). The Paleogeographic Conditions for the Late Eocene sediments of Zhytomyr Polissya in connection with their amber content (on the example of the «Pravoberezhna» site). Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series «Geology. Geography. Ecology», (61), 108-120. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-09 [in Ukrainian].*
17. *Yakovleva V.V., Panchenko V.P. (2004). Amber of Western Polesie and other regions of Ukraine. Priroda Zahidnogo Polissya ta prileglih teritorij: Zb. nauk. pr. Lutsk, 23-32 [in Ukrainian].*
18. *Bijl P.K., Brinkhuis H. (2023). An open-access taxonomic and stratigraphic database of organic-walled dinoflagellate cysts, J. Micropalaeontol., 42, 309-314. DOI https://doi.org/10.5194/jm-42-309-2023*
19. *Bohaty S.M., Zachos J.C., Florindo F., Delaney, M.L. (2009). Coupled greenhouse warming and deep-sea acidification in the middle Eocene. Paleoceanography, 24. https://doi.org/10.1029/2008PA001676*
20. *Gedl P. (2013). Eocene dinoflagellate cysts from the Popiele beds at Koniusza (Skole Nappe, Flysch Carpathians, Poland): taxonomy, biostratigraphy, and palaeoenvironmental reconstruction of a marginal marine basin. Studia Geologica Polonica, 135, 197.*
21. *Fedotova Z.A., Perkovsky E.E. (2012). Gall Midges of the Supertribe Stomatosematidi (Diptera, Cecidomyiidae) in the Palaearctic Region, with Descriptions of New Taxa from the Late Eocene Rovno Amber. 2. The Genera Didactylomyia and Rovnodidactylomyia gen. n. Entomological review, 92, 565-575. https://doi.org/10.1134/S0013873812050090*
22. *Mendonça Filho J.G., Menezes T.R., Mendonca J.O. et al. (2012). Organic Facies: Palynofacies and Organic Geochemistry Approaches Geochemistry. Geochemistry. Earth and System Processes, 1, 211-245.*
23. *Perkovsky E.E., Zosimovich V.Yu., Vlaskin A.Yu. (2003). Rovno amber fauna: a preliminary report. Acta zoologica cracoviensia. 46. 423-430.*

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 1 October 2025
Accepted 20 November 2025

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-06
УДК 56:551.735.1(477)

Надійшла 16 липня 2025 р.
Прийнята 27 жовтня 2025 р.

Іхнофосилії з відкладів серпуховського ярусу (міссісіпій) Моспанівської структури (Дніпровсько-Донецька западина)

Родіон Моїсеєнко [1,2]
аспірант кафедри прикладної та фундаментальної геології
[1] Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, Харків, Україна;
мол. наук. співробітник лабораторії літофізичних досліджень комплексної лабораторії дослідження керну, [2] філія УкрНДІгаз АТ «Укргазвидобування», Харків, Україна,
e-mail: rodion.moiseienko@ugv.com.ua, http://orchid.org/0009-0006-5855-0277

Стаття присвячена дослідженню, опису та систематизації слідів життєдіяльності організмів, що були знайдені у серпуховському ярусі карбону в межах Моспанівської структури. Містить коротку характеристику стану дослідженості іхнотекстур в Україні та світі. Окреслена важливість вивчення іхнотекстур, як невід'ємної частини комплексного дослідження керну, відібраного з осадових товщ. Дослідження проводилось на керновому матеріалі, що повністю розкривав інтервал проходки, включало аналіз літературних даних та власні спостереження. Проаналізовано керн із чотирьох свердловин, вперше в Україні проведено детальний іхнологічний аналіз по керну нафтогазових свердловин. Відклади представлені пісковиком, алевролітом, аргілітом, окремими поодинокими прошарками вапняку та вугілля. Іхнотекстури представлені родами Arenicolites, Gastrochaenolites, Lingulichnus, Macaronichnus, Palaeophycus, Planolites, Skolithos, Teichichnus, Thalasinoides та слідами кореневих систем, що вказує на високе загальне іхнорізноманіття відкладів та неоднорідність умов їх утворення. Розподілення іхнотекстур по розрізу неоднорідне. Проведена систематизація за морфологічним методом. Описані морфологічні особливості іхнотекстур: орієнтація, розгалуження, загальна форма, наявність або відсутність облямівки, а також розміри і характерні розрізи в керні. До кожного визначеного іхнотаксону надані фото зовнішнього вигляду в керні та схематичні зображення, оскільки зовнішній вигляд іхнотекстур в розрізі керну значно відрізняється від такого у відслоненнях, де були здійснені їх першоописи. Проаналізована палеоекологічна та палеогеографічна валентність кожної іхнотекстури, вказані вірогідні організми-утворювачі, що створює підґрунтя для подальшого аналізу умов утворення гірських порід. Зроблені висновки щодо утворення іхнотекстур в широкому спектрі різнофаціальних відкладів – від континентальних до віддалено-морських. Обґрунтована необхідність проведення в подальшому детального фаціального аналізу.

***Ключові слова**: іхнологія, іхнотекстури, серпуховський ярус, Дніпровсько-Донецька западина, літологія, кам'яновугільна система, дослідження керну, уламкові породи.*

Як цитувати: Моїсеєнко Родіон (2025). Іхнофосилії з відкладів серпуховського ярусу (міссісіпій) Моспанівської структури (Дніпровсько-Донецька западина). *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*, (63), 84-94. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-06

In cites: Moiseienko Rodion (2025). Trace fossils from Serpukhovian (Mississipian) sediments of Mospanivska geological structure (Dniper-Donetsk depression). *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 84-94. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-06 [in Ukrainian]

Вступ. Іхнотекстури – сліди життєдіяльності організмів, відображені у вигляді текстурних особливостей гірських порід. Вивчення окремих іхнотекстур та їх комплексів дозволяє значно доповнити результати літолого-фаціального аналізу, виконаного з урахуванням лише абіогенних факторів седиментації. Крім того, іхнотекстури є важливим джерелом палеонтологічної та палеоекологічної інформації, особливо за відсутності скелетних фосилій, є особливістю уламкових порід, що накопичилися в умовах активної гідродинаміки: алевролітів, пісковиків тощо. Між тим, саме такі породи є найбільш розповсюдженими колекторами вуглеводнів в Дніпровсько-Донецькій западині. Особливе значення вивчення іхнотекстур має при дослідженні складних седиментаційних систем: дельт, бар'єрних островів, смуг порізаного узбережжя.

Особливої ваги дані, отримані за допомогою вивчення іхнотекстур, набувають в контексті поступового вичерпання крупних традиційних покладів вуглеводнів та заміна їх більш дрібними та складними. Зважаючи на те, що обсяги відбору керну, порівняно із двадцяти- тридцятирічною давниною не тільки не збільшуються, а подекуди і скорочуються, гостро постає питання моделювання більш складних та дрібних родовищ спираючись на меншу кількість прямих геологічних даних. Це змушує вдаватися до більш детального вивчення наявного кернового матеріалу з метою отримання максимальної кількості інформації.

Отже, аналіз іхнотекстур, постає важливим аспектом опису керну. Важливо відмітити, що зовнішній вигляд іхнотекстур у відслоненнях, де були описані більшість таксономічних одиниць, може кардинально відрізнятися від їхнього вигляду на повздовжньому зрізі керну. Вивчення іхнофосилій в такому вигляді уточнює дані щодо їх тривимірної будови, а також розширює уявлення про мінливість слідів. Отже, мета роботи полягує визначення та опис іхнотекстур в серпуховських відкладах Моспанівської структури

© Моїсеєнко Родіон, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

(Дніпровсько-Донецька западина, Харківська область). Завданням дослідження є визначення таксономічної належності іхнотекстур; опис морфології; систематизація. Вибір серпуховських відкладів Моспанівської структури в якості об'єкту дослідження зумовлений їхнім іхнотекстурним різноманіттям та задовільною кількістю кернового матеріалу.

Аналіз попередніх публікацій. Вивчення іхнофосилій є важливою частиною седиментологічних досліджень, яке набуває особливої значущості протягом останніх 50 років. Серед значної кількості публікації зарубіжних авторів особливо важливими є великі узагальнюючі роботи: Зейляхера [28] (описана та введена в ужиток концепція іхнофацій); Екдейла та Мейсона [18] (охарактеризовані угрупування іхнотекстур в киснево збіднілих умовах); Бромлі [10] (детально описані способи застосування іхнотекстур для палеоекологічних інтерпретацій); Гасіотіса та ін. [21] (описано детальні актуалістичні дослідження щодо умов розвитку іхнотекстур); Кнауста та Бромлі [22] (зібрано надзвичайно детальну характеристику стану, методик та практичних застосувань досягнень іхнології); Кнауста [23] (створено атлас іхнотекстур, орієнтований на визначення їх в керні).

В минулому сторіччі питанням іхнофосилій займались такі українські вчені, як Вялов [1], Гурєєв [2], Палій [8] та інші.

Сучасні автори торкаються цієї теми в публікаціях палеонтологічної тематики в межах загальної літологічної характеристики: [3, 4, 6]. Існують також публікації з описом окремих знахідок іхнофосилій [5; 15] та їх комплексів [3, 7].

Матеріали та методи.

В роботі використані матеріали, отримані під час дослідження кернового матеріалу із свердловин, пробурених з метою пошуку вуглеводнів в межах Моспанівської структури. Моспанівська структура знаходиться в межах Платівсько-Граківської структурно-тектонічної зони північної прибортової ділянки Дніпровсько-Донецької западини.

Досліджено керновий матеріал, відібраний із чотирьох свердловин. Загалом, досліджено 86,7 метрів повнорозмірного керну. Розкриті в керні відклади представлені пісковиком, алевролітом, аргілітом, окремими поодинокими прошарками вапняку та вугілля. Попередньо керн розпилювався повздовжньо, потім робилися панорамні фотографії в білому світлі у високій роздільній здатності. Іхнотекстури визначалися на поверхнях повздовжнього розпилу та, в окремих випадках, на поперечних зламах. Слід зауважити, що розмір іхнофосилій на поверхні розрізу безпосередньо залежить від площини зрізу. Для описаних іхнофосилій подані розміри, видимі на площині розрізу. Визначення іхнотекстур виконані за методикою морфологічно-порівняльного аналізу. Для систематизації іхнотекстур використаний заснований на морфологічних ознаках метод морфологічних іхнотаксобазисів [22]. Згідно нього, кожна іхнофосилія характеризується п'ятьма іхнотаксобазисами, які слідують один за одним в ієрархічній послідовності:

I. Орієнтація
II. Наявність розгалуження
III. Форма
IV. Заповнення
V. Наявність футерівки

Орієнтація описується, як субгоризонтальна, або субвертикальна, окремо виділяються іхнотекстури зі складною орієнтацією. Типові форми наведені в [22]. Заповнення описується, як активне – утворене внаслідок занесення організмом-утворювачем субстрату всередину нірки, або пасивне – утворене внаслідок заповнення ходу оточуючим субстратом або породою абіогенними чинниками. Розгалуження та облямівка описуються бінарно: наявне або відсутнє.

Подальше розділення іхнотекстур на роди відбувається з урахуванням як морфологічних, так і етологічних особливостей. Такий підхід дозволяє швидко класифікувати іхнотекстури, в тому числі, в польових умовах та використовується багатьма дослідниками [12]; [23]; [29]. Для більш наближеної до палеонтологічної класифікації за передбачуваними утворювачами рекомендується ознайомитись з класифікацією Вялова [1].

За попереднім визначенням, що наразі уточняється, весь досліджений матеріал належить до відкладів серпуховського віку кам'яновугільної системи.

Результати та обговорення. Комплекс іхнофосилій із серпуховських відкладів Моспанівської структури складається з 10 паратаксонів, серед яких шість іхновидів та три іхнофосилії, що визначені лише до іхнороду; окремою групою є рештки кореневих систем рослин.

Arenicolites isp. (рис. 1)

Морфологія: субвертикальні U-подібні (на поверхні розпилу – J-подібні) нірки із активним заповуеннням і тонкою глинистою футеровкою. Видима довжина – до 25 мм; видима товщина трубки – до 4 мм. Внутрішня текстура масивна.

Етологія: сліди існування всередині осаду (domichnia), трофічна група – поїдачі осаду (тут і далі – етологія за Мінтер та ін. [27], якщо не вказано інше).

Організми-утворювачі: багатощетинкові черви, ракоподібні амфіподи, голотурії та інші.

Палеоекологічні умови: переважно морські (від мілко- до глибоководних), але можуть зустрі-

чатись і в континентальних відкладах. Характерні для систем з високою гідродинамікою: штормових відкладів, мігруючих дюн та барів. При низькому іхнотаксономічному різноманітті є індикатором стресових умов: наприклад, зниженої або змінної солоності. В таких умовах відображають опортуністичну колонізацію субстрату [23].

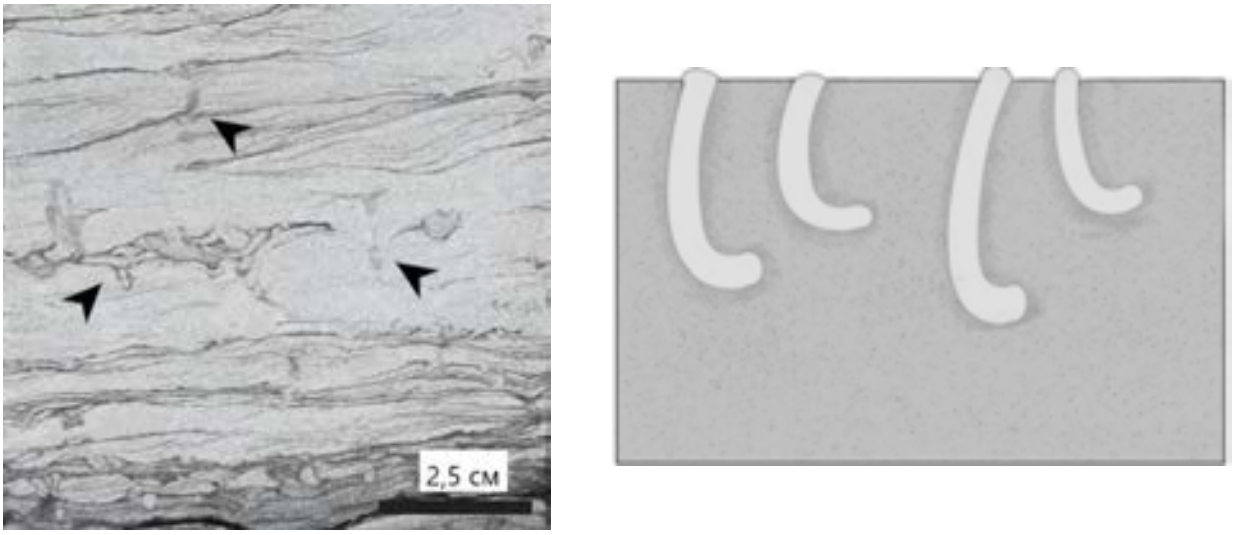
Gastrochaenolites isp. (рис. 2)

Морфологія: булавоподібні та конічні субвертикальні текстури без футерівки із пасивним заповненням, утворені в мінеральному субстраті. Представлені в повздовжньому розрізі. Видима довжина – до 6 мм, видима ширина – до 8 мм.

Етологія: перфорації, сліди існування всередині осаду (domichnia), трофічна група – поїдачі суспензії.

Організми-утворювачі: двостулкові молюски.

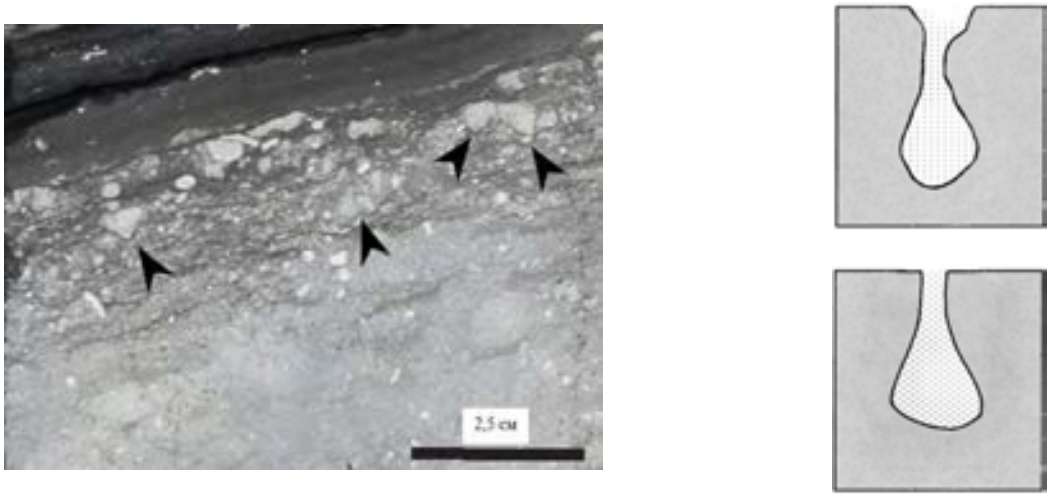
Палеоекологічні умови: є індикаторами ущільненості субстрату, низьких швидкостей седиментації в наближених до берега умовах. В карбонатних відкладах особливо часто розглядаються як індикатори пауз у накопиченні осаду [19].



a b

Рис. 1. Іхнофосилії *Arenicolites* isp. **a.** На поверхні повздовжнього розпилу (вказані чорними стрілками) **b.** Графічна інтерпретація /

Fig. 1 Trace fossils *Arenicolites isp.* **a)** on a longitude-cutting surface (arrowed) **b)** graphic interpretation



a b

Рис. 2. Іхнофосилії *Gastrochaenolites* isp. **a.** На поверхні повздовжнього розпилу (вказані чорними стрілками) **b.** Графічна інтерпретація /

Fig. 2. Trace fossils *Gastrochaenolites* isp. **a)** on a longitude-cutting surface (arrowed) **b)** graphic interpretation

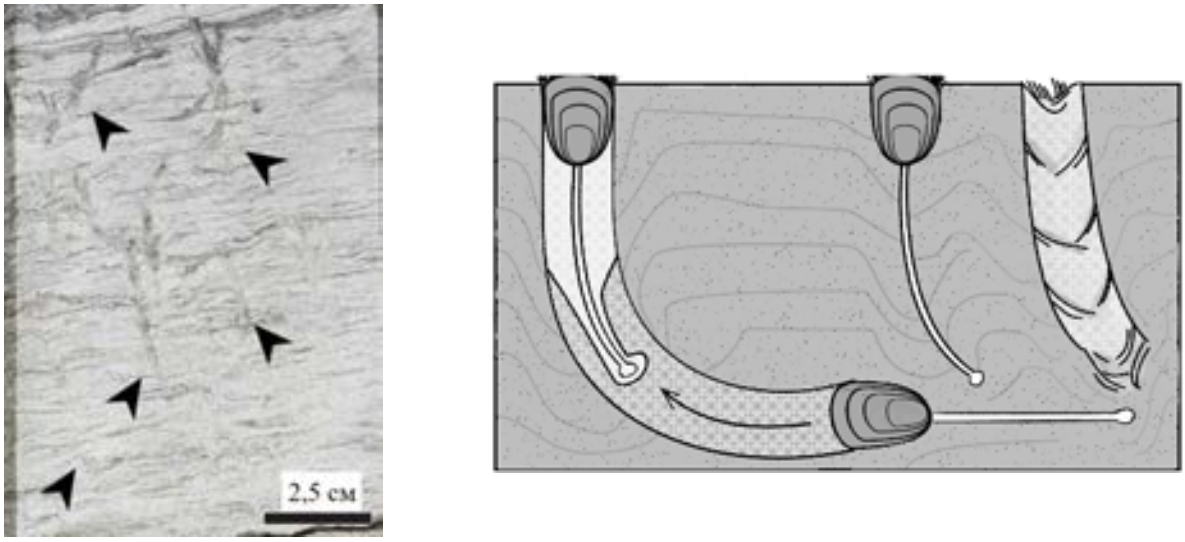
Lingulichnus verticalis Hakes, 1976 (рис. 3)

Морфологія: вертикальні або похилі нірки J- або U-подібної форми. Мають тонку глинисту футерівку із шпрейтоподібною текстурою та центральне, пасивно заповнене ядро. Представлені у повздовжньому та поперечному розрізах. Верхня частина місцями воронкоподібна. Видима довжина – до 50 мм, видима товщина – до 6 мм. Видимий кут нахилу відносно поверхні нашарування – 70°-90°.

Етологія: сліди існування всередині осаду (domichnia), трофічна група – поїдачі суспензії.

Організми-утворювачі: лінгулоїдні брахіоподи [30].

Палеоекологічні умови: захоронюються в умовах із швидкою седиментацією; утворюються, переважно, в піщаному субстраті від тонко- до середньозернистої розмірності. Характерні для мілководно-морських умов. Оскільки організми утворювачі еврігалінні, часто трапляються в прибережних частинах акваторії басейнів: лагунах, естуаріях, дельтах [30].



a b

Рис. 3. Іхнотекстури *Lingulichnus verticalis*. **a.** На поверхні повздовжнього розпилу (вказані чорними стрілками) **b.** Спосіб утворення /

Fig. 3. Trace fossils *Lingulichnus* verticalis **a)** on a longitude-cutting surface (arrowed) **b)** formation

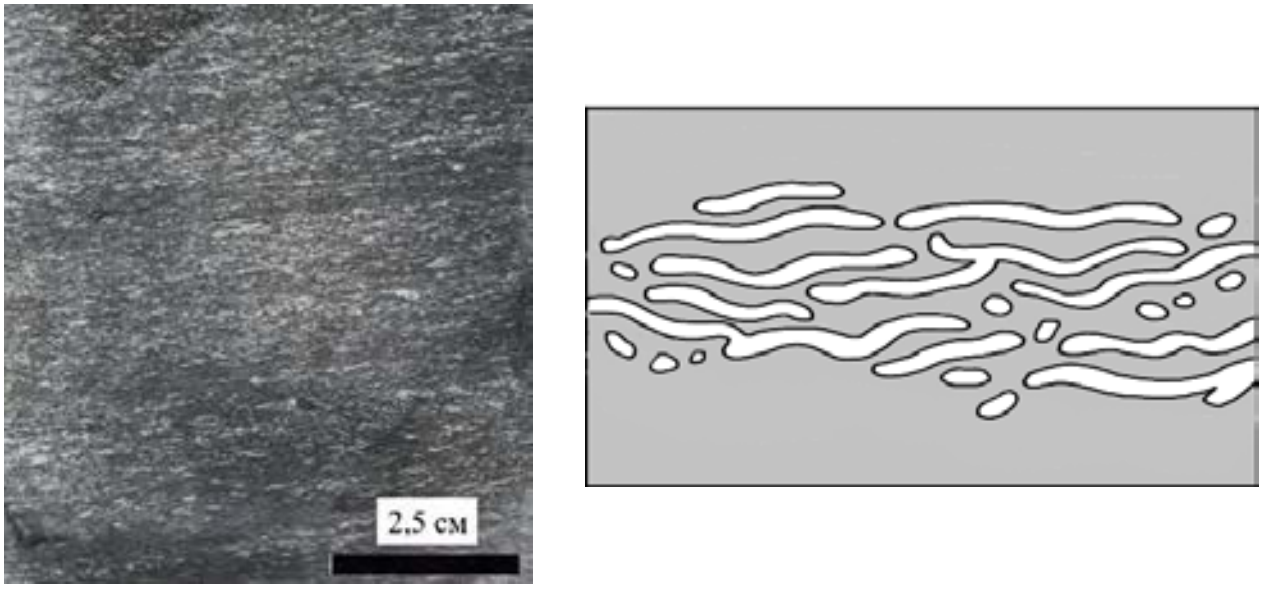
Macaronichnus segregatis Clifton et Thompson, 1978 (рис. 4)

Морфологія: горизонтальні звивисті, циліндричні нірки з тонкою темноколірною футеріВкою та активним заповненням. Трапляються щільними угрупуваннями, переважно у поперечному зрізі. Видимий діаметр – до 2 мм.

Етологія: сліди харчування (fodinichnia), трофічна група – поїдачі осаду.

Організми-утворювачі: офелідні багатощетинкові черви [13].

Палеоекологічні умови: утворюються в припливних умовах, в зоні наближеній до берегової лінії (shoreface та foreshore), а також у відкладах



a b

Рис. 4. Іхнофосилії *Macaronichnus segregatis*. **a.** На поверхні повздовжнього розпилу (по всій поверхні керну) **b.** Графічна інтерпретація /

Fig. 4. Trace fossils *Macaronichnus segregatis* **a)** on a longitude-cutting surface (arrowed) **b)** graphic interpretation

фронтальної частини дельти [11]. Зазвичай вважаються маркером стабільних умов седиментації [23].

Palaeophycus tubularis Hall, 1847 (рис. 5)

Морфологія: субгоризонтальні циліндричні ходи із тонкою темноколірною футерівкою та пасивним заповненням. Трапляються в повздовжньому та поперечному зрізі. Видимий діаметр – до 4 мм.

Етологія: сліди існування всередині осаду (domichnia), трофічна група – поїдачі суспензії або хижаки.

Організми-утворювачі: черви та, ймовірно, інші групи організмів [23].

Палеоекологічні умови: в морських (перехідних) умовах характерні для дельтових відкладів з помірною гідродинамікою: від дельтової рівнини до фронтальної частини дельти. Можуть траплятись як в комплексах із помірним іхнорізноманіттям, так і самостійно – як маркер опортуністичної колонізації [25].

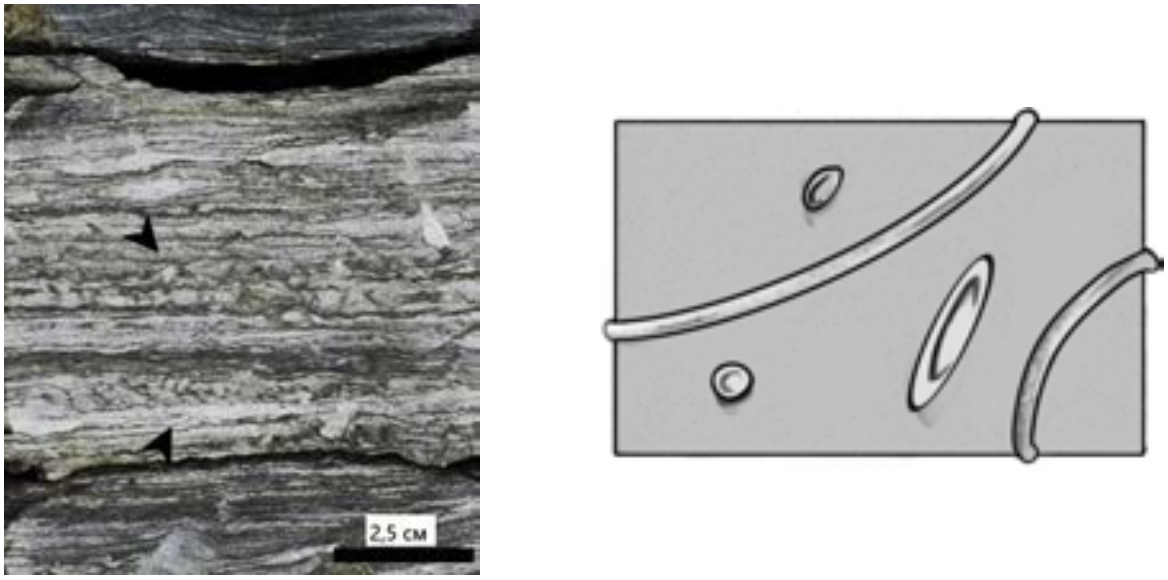
Planolites montanus Richter, 1934 (рис. 6)

Морфологія: горизонтальні циліндричні нірки із активним заповненням, без розгалуження та футерівки. На поверхні повздовжнього розпилу представлені в поперечному розрізі - дрібними овалами від 1 мм до 4 мм в діаметрі.

Етологія: сліди харчування (fodinchnia), трофічна група – поїдачі осаду.

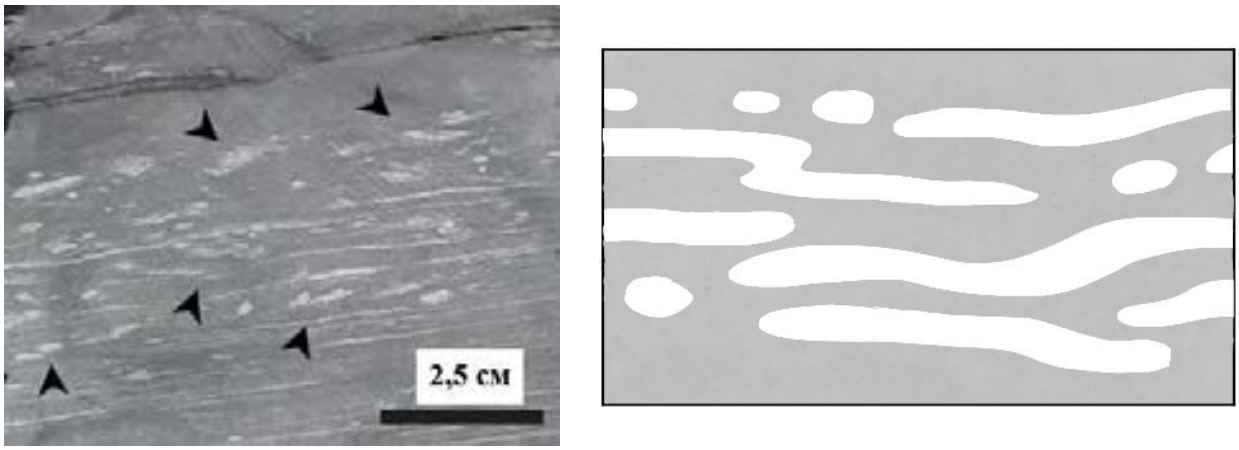
Організми-утворювачі: червоподібні, членистоногі, молюски та інші.

Палеоекологічні умови: будь-які, придатні



a b

Рис. 5. Іхнотекстури *Palaeophycus tubularis*. **a.** На поверхні повздовжнього розпилу в формі двох прошарків, вказані чорними стрілками **b.** Схематично /
Fig. 5. Trace fossils *Palaeophycus tubularis* **a)** on a longitude-cutting surface (in form of two layers pointed with black arrows) **b)** schematically



a b

Рис. 6. Іхнотекстури *Planolites montanus.* **a.** На поверхні повздовжнього розрізу (вказані чорними стрілками) **b.** Графічна інтерпретація /
Fig. 6. Trace fossils *Planolites montanus* **a)** on a longitude-cutting surface (arrowed) **b)** graphic interpretation

для формування іхнотекстур [23].

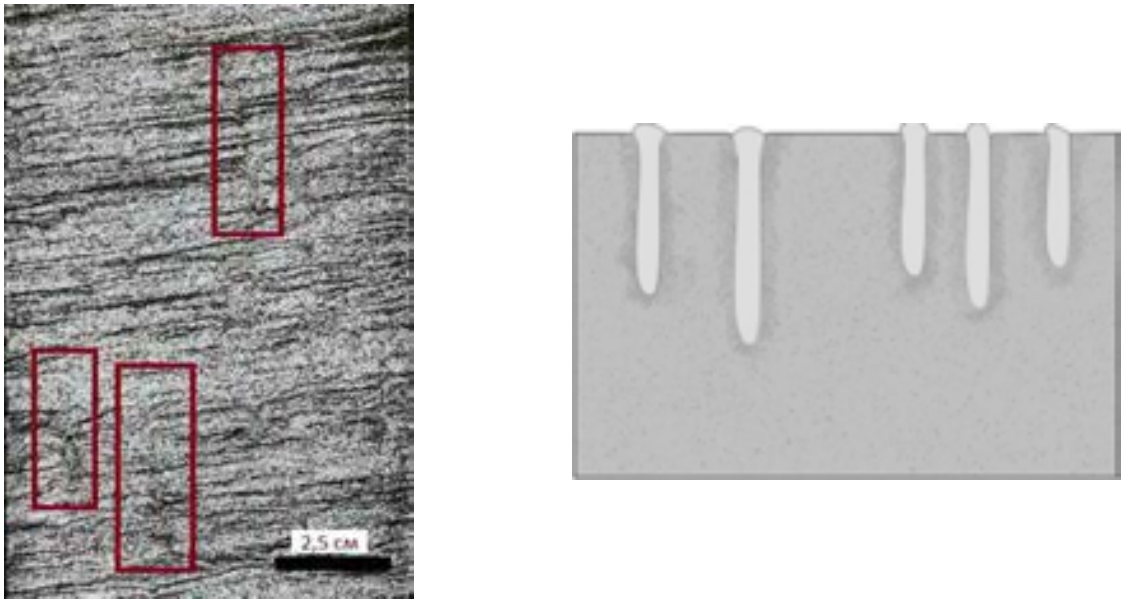
Skolithos verticalis Hall, 1843 (рис. 7)

Морфологія: вертикальні циліндричні ходи із дуже тонкою або повністю відсутньою облямівкою. Видима довжина – до 5 мм, товщина – до 2 мм.

Етологія: сліди існування всередині осаду (domichnia), трофічна група – поїдачі суспензії.

Організми-утворювачі: черви, актинії, ракоподібні, молюски, корені рослин [23].

Палеоекологічні умови: вважаються типовим індикатором морських та перехідних умов із високою гідродинамікою, від прибережних до мілководно-морських [16].



a b

Рис. 7. Іхнотекстури *Skolithos verticalis*. **a.** На поверхні повздовжнього розпилу (вказані червоними прямокутниками). **b.** Графічна інтерпретація /

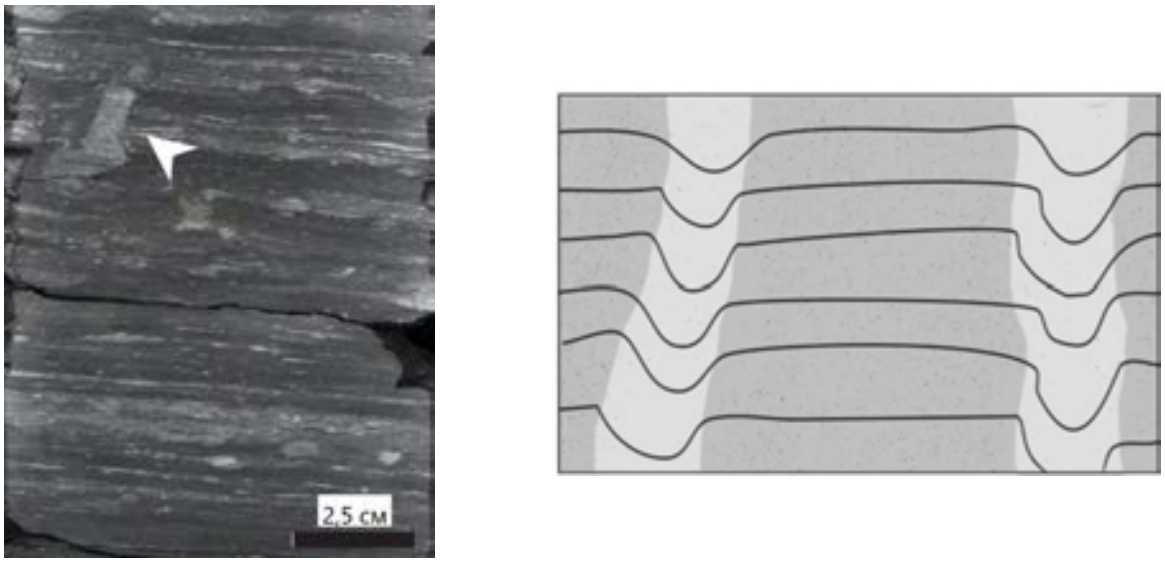
Fig. 7. Trace fossils *Skolithos verticalis* **a)** on a longitude-cutting surface (outlined) **b)** graphic interpretation

Teichichnus rectus Seilacher, 1955 (рис. 8)

Морфологія: вертикальна стіноподібна іхнотекстура, у зрізі викривлена. На поверхні зпилу керну представлена вузькими (ймовірно, кутовими) зрізами. Довжина сягає 7 мм, та ширина – 4 мм. Внутрішня текстура шпрейтова, вигнута донизу.

Етологія: сліди харчування (fodinchnia), трофічна група – поїдачі осаду.

Організми-утворювачі: черви [14].



a b

Рис. 8. Іхнотекстура Teichichnus rectus. **a.** На поверхні повздовжнього розпилу (вказана білою стрілкою) **b.** Графічна інтерпретація /

Fig. 8. Trace fossils *Teichichnus rectus* **a)** on a longitude-cutting surface (arrowed) **b)** graphic interpretation

Палеоекологічні умови: характерні для систем з силікатно-уламковою седиментацією, найбільш типові для дельтових відкладів. Еврігалінні, поширені в естуаріях, лагунах, гирлових барах, зазвичай, в умовах низького іхнорізноманіття. Також поширені в припливно-відпливних відкладах.

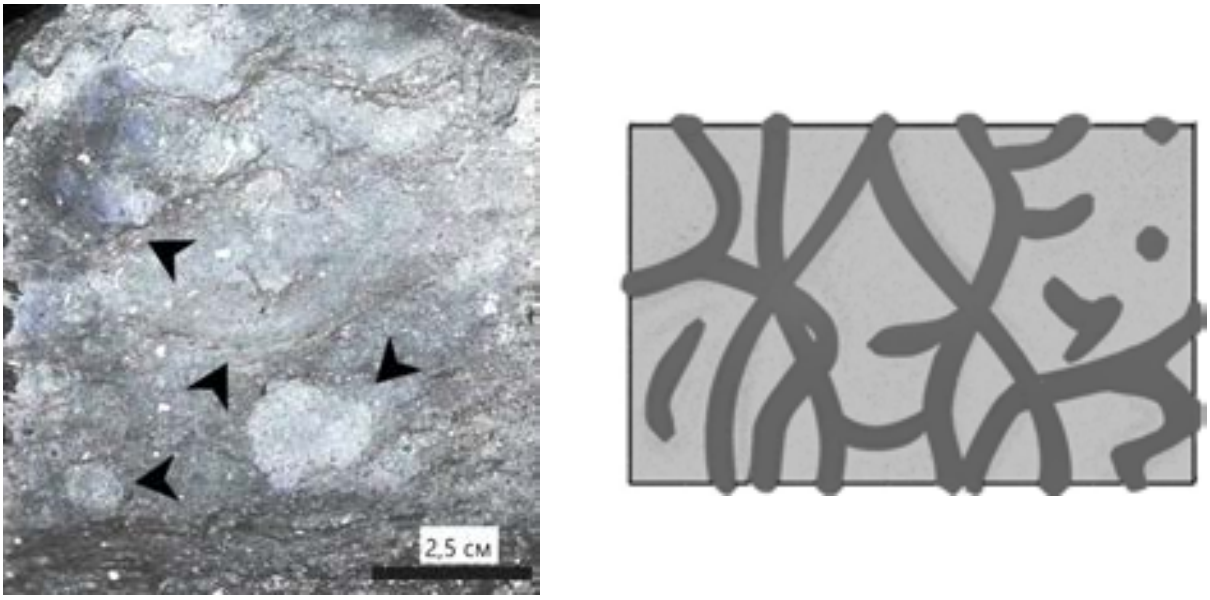
Thalassinoides isp. (рис. 9)

Морфологія: циліндричні, переважно субгоризонтальні ходи із пасивним заповненням, без футерівки. Видимий діаметр – до 2 мм. Внутрішня текстура гомогенна.

Етологія: частіше за все являють собою поєднання слідів заривання (domichnia) та харчування (fodinchnia), поїдачі суспензї та/або осаду.

Організми-утворювачі: членистоногі, актинії та черви.

Палеоекологічні умови: типові представники прибережно-морських іхноасоціацій, часто асоціюються з карбонатними відкладами. Еврігалінні, трапляються у відкладах дельт, лагун, естуаріїв. Часто поширені в твердих субстратах [17].

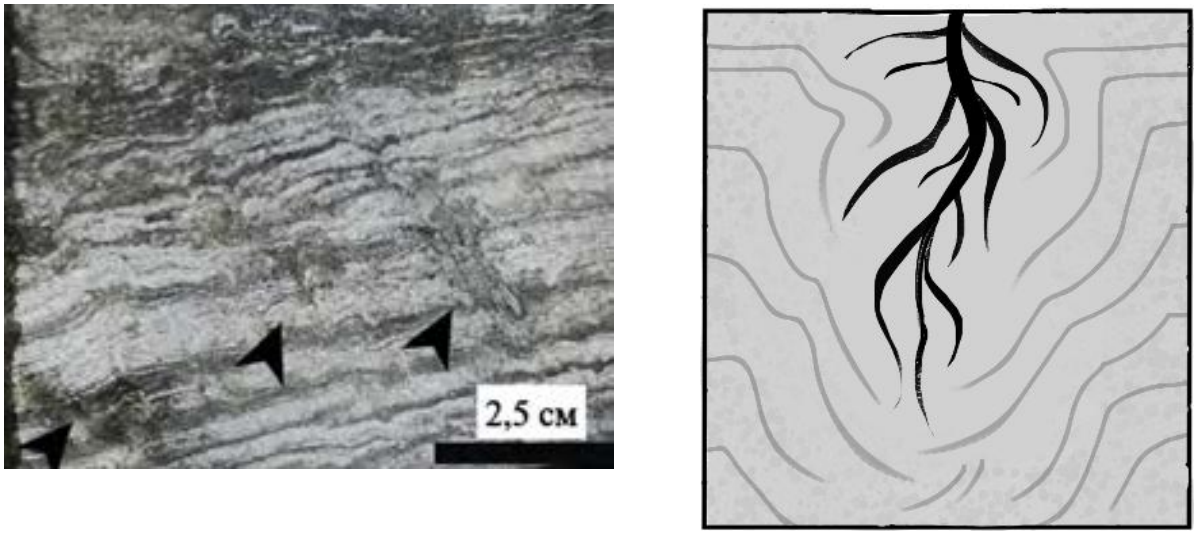


a b

Рис. 9. Іхнотекстури *Thalasinoides* isp. **a.** На поверхні повздовжнього розрізу (вказані чорними стрілками) **b.** Графічна інтерпретація /
Fig. 9. Trace fossils *Thalasinoides* isp **a)** on a longitude-cutting surface (arrowed) **b)** graphic interpretation

Сліди кореневих систем рослин (рис. 10)

Морфологія: субвертикальні розгалужені текстури, місцями підкреслені вуглистим детритом. Представлені, переважно, в повздовжньому



a b

Рис. 10. Сліди кореневих систем. **a.** На поверхні повздовжнього розпилу (вказані чорними стрілками) **b.** Графічна інтерпретація /
Fig. 10. Plant root trace fossils **a)** on a longitude-cutting surface (arrowed) **b)** graphic interpretation

розрізі. Характеризуються темно-сірим кольором, поширені в сірій, майже неокисненій породі зі збереженою шаруватою структурою. Довжина – до 300 мм, товщина – до 4 мм.

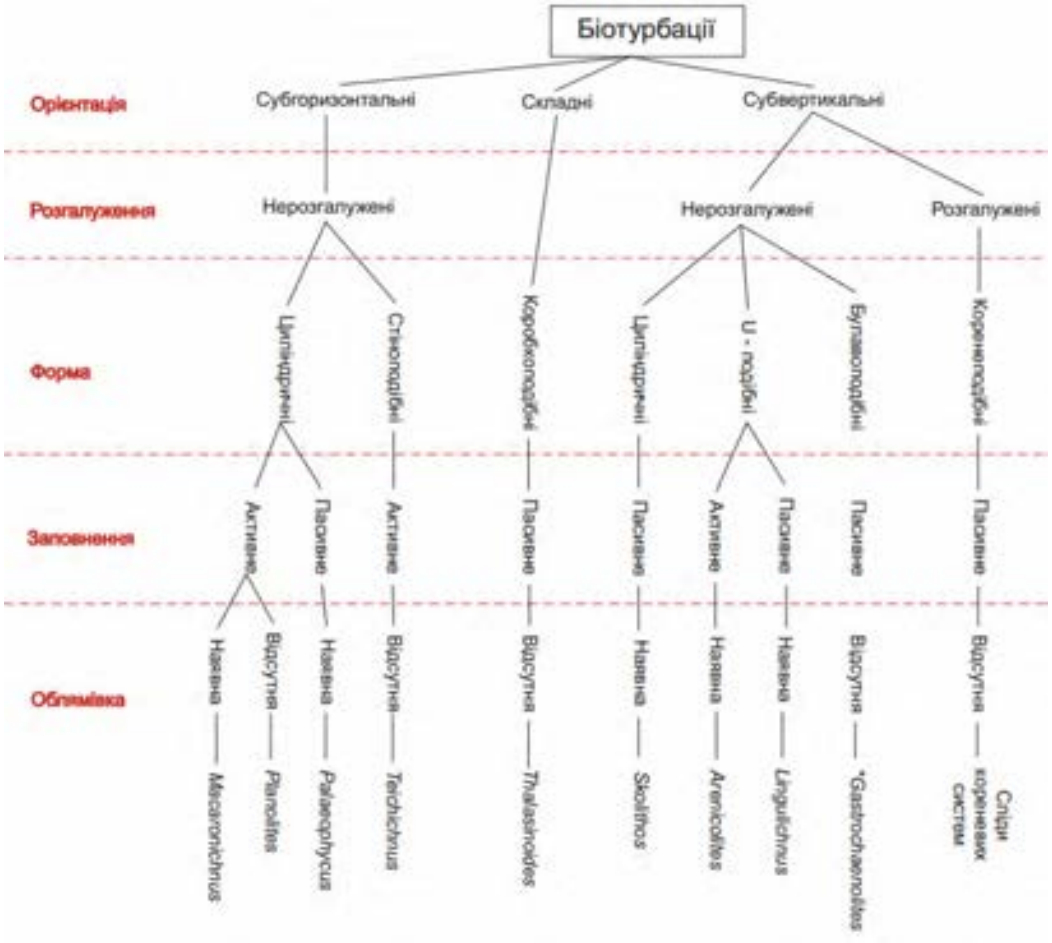
Етологія: сліди кореневих систем (sphenoichnia) [26].

Організми-утворювачі: наземні рослини.

Палеоекологічні умови: характерні для дуже слабко осушуваних палеоґрунтів [24]. Ймовірно, утворилися в характерній для карбонових відкладів зони мангроподібних заростей.

На рис. 11 представлена схема систематизації визначених та описаних в роботі іхнотекстур.

Висновки. Вперше для Дніпровсько-Донецької западини визначені та описані іхнофосилії із керну нафтогазових свердловин. Описані іхнотекстури характеризуються високим морфологічним та паратаксономічним різноманіттям, а також різною палеогеографічною та палеоекологічною валентністю. Для іхнологічних комплексів наявність більше, ніж 5 – 6 іхнотаксонів вважається ознакою високого іхнорізноманіття [20]. Із цього можна зробити висновок, що досліджені відклади або накопичилися в умовах, що сприяли розвитку значної кількості іхнотаксонів, або належать до різних умов утворення, кожні з яких характеризуються власним комплексом іхнотекстур. Зважаючи на літологічну неоднорідність відкладів, другий варіант вбачається більш вірогідним.



* - рід *Gastrochaenolites* відноситься до слідів біоерозії

Рис. 11 Систематизація визначених іхнофосилій (за [22]) /
Fig. 11. Systematics of the defined trace fossils (after [22])

Отже, досліджені іхнотекстури вказують на різноманітний фаціальний склад серпуховських відкладів, розкритих в межах Моспанівської структури: від умовно континентальних (із наявністю слідів кореневих систем) до віддаленоморських (із наявністю текстур *Teichichnus*) фацій. Окремої уваги заслуговує той факт, що для всіх описаних іхнотекстур, характерних для прибережно-морських умов (*Arenicolites*, *Lingulichnus* та *Skolithos*), існують еврігалінні організми-утворювачі. Наявність такого комплексу іхнотекстур може бути маркером розпріснення або засолонення басейну в прибережній зоні. Це, в свою чергу, дає змогу охарактеризувати умови утворення відкладів, як перехідні від континентальних до морських. Відповідно, іхнологічний аналіз дає підґрунтя для проведення детального фаціального розділення вивчених відкладів.

Список використаних джерел

1. Вялов О.С. (1966). Следы жизнедеятельности организмов и их палеонтологическое значение. Київ, Наукова думка, 219.
2. Гурєєв, Ю. А. (1983). Фаунистические остатки и следы жизнедеятельности беспозвоночных, их стратиграфическая приуроченность к разрезу верхнего докембрия – нижнего кембрия Среднего Приднестровья. Ископаемая фауна и флора Украины. Київ, Наукова думка. 34–39.
3. Дернов В., Удовиченко Н (2023). Іхнофосилії з відкладів бучацької світи (лютецький ярус, еоцен) Луганщини та їхнє палеогеографічне значення. GEO&BIO 24. 106-140. DOI: https://doi.org/10.15407/gb2408
4. Матвєєв А., Колосова І., Курепа Я., Синєгубка В., Шоміна А. (2017). Палеонтологічна характеристика туронських відкладів західного схилу Українського щита. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (47), 26-37. DOI: https://doi.org/10.26565/2410-7360-2017-47-03
5. Мєнасова А. (2017). Імовірний механізм походження відбитків Nemiana Simplex Palij. Вісник Київського національного університету ім. Т. Шевченка. Геологія. 3(78). Київ, 6-10.
6. Мєнасова А., Крочак М. (2021). Реконструкція умов осадонакопичення в пізній крейді канівського Придніпров'я за викопними рештками базального горизонту Канівської світи. Матеріали Міжнакродної наукової конференції та XL сесії Української палеонтологічної спілки НАН України. Київ, 42-44.
7. Огієнко О., Тимченко Ю., Мєнасова А. (2021). Сліди життєдіяльності ракоподібних ряду Stomatopoda у Київській світі еоцену Житомирщини. Матеріали Міжнакродної наукової конференції та XL сесії Української палеонтологічної спілки НАН України. Київ, 68-69.
8. Палій, В. М. (1976). Остатки бесскелетной фауны и следы жизнедеятельности из отложений верхнего докембрия и нижнего кембрия Подолии. Палеонтология и стратиграфия верхнего докембрия и нижнего палеозоя юго-запада Восточно-Европейской платформы. Київ, Наукова думка. С. 63–77.
9. Синєгубка В. (2021). Дослідження решток остракод з сеноман-туронських відкладів південно-західної окраїни Українського щита (попередні результати). Матеріали Міжнародної наукової конференції та XL сесії Української палеонтологічної спілки НАН України. Київ, 44-46.
10. Bromley R.G. (1996). Trace fossils: biology, taphonomy and applications. Chapman and Hall, London. 361. DOI: https://doi.org/10.1017/S0016756897316987
11. Bromley R.G., Uchman A, Milàn J. (2009). Rheotactic Macaronichnus, and human and cattle trackways in Holocene beachrock, Greece: reconstruction of paleoshoreline orientation. Ichnos 16. 103–117. DOI: https://doi.org/10.1080/10420940802470987
12. Buatois L.A., Mangano M.G. (2011). Ichnology. Organism-Substrate Interactions in Space and Time. Cambridge University Press, Cambridge. 358. DOI: https://doi.org/10.1017/S0016756811001038
13. Clifton H.E., Thompson J.K. (1978). Macaronichnus segregatis: a feeding structure of shallow marine polychaetes. J Sediment Petrol 48. 1293–1302. DOI: https://doi.org/10.1306/212f7667-2b24-11d7-8648000102c1865d
14. Dashtgard S.; Gingras M.; MacEachern, J. (2012). The potential of trace fossils as tidal indicators in bays and estuaries. Sedimentary Geology 279. 97-106. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2011.05.007
15. Dernov, V. (2023). Mammillichnis monstrum isp. nov., a new sea anemone trace fossil from the Carboniferous of the Donets Basin, Ukraine. GEO&BIO. 23. 65-76. DOI: https://doi.org/10.15407/gb2306
16. Droser M. (1991). Ichnofabric of the Paleozoic Skolithos Ichnofacies and the nature and distribution of Skolithos piperock. Palaios 6. 316–325. DOI: https://doi.org/10.2307/3514911
17. Ekdale A., Bromley R. (2003). Paleoethologic interpretation of complex Thalassinoides in shallow-marine limestones, Lower Ordovician, southern Sweden. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol 192. 221–227. DOI: https://doi.org/10.1016/S0031-0182(02)00686-7
18. Ekdale A., Mason T. (1988). Characteristic trace-fossil associations in oxygen-poor sedimentary environments. Geology 16(8). 720-723. DOI: https://doi.org/10.1130/0091-7613(1988)016<0720:CTFAIO>2.3.CO;2
19. Garcia-Hidalgo J.; Gil-Gil J. (2024). Firmgrounds and hardgrounds in the Coniacian carbonate platform of the Iberian basin: Origin and model for development of omission surfaces in tidal environments. Sedimentary geology 470. 106713. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2024.106713
20. Grosskopf J.F. (2015). Using trace-fossils to determine the role of oceanic anoxic event II on the Cretatious western unterior seaway paleoenvironment. A Dissertation in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. Louisiana State University. 232.
21. Hasiotis S., Platt B., Reilly M., Amos K., Lang S., Kennedy D., Todd J., Michel E. (2012). Actualistic Studies of the Spatial and Temporal Distribution of Terrestrial and Aquatic Organism Traces in Continental Environments to Differentiate Lacustrine from Fluvial, Eolian, and Marine Deposits in the Geologic Record. DOI: https://doi.org/10.1306/13291400M953457
22. Knaust D., Bromley R.G. (eds). (2012). Trace Fossils as Indicators of Sedimentary Environments. Developments in Sedimentology. 64. 924. DOI: https://doi.org/10.1017/S0016756813001118
23. Knaust D. (2017) Atlas of Trace Fossils in Well Core: Appearance, Taxonomy and Interpretation. Springer International Publishing, Stavanger. 209. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-49837-9
24. Kraus M.J., Hasiotis S.T. (2006). Significance of different modes of rhizolith preservation to interpreting paleoenvironmental and paleo- hydrologic settings: examples from Paleogene paleosols, Bighorn Basin, Wyoming, U.S.A. J Sediment Res. 76. 633–646. DOI: https://doi.org/10.2110/jsr.2006.052
25. Melchor R.N., Bellosi E., Genise J.F. (2003). Invertebrate and vertebrate trace fossils from a lacustrine delta: the Los Rastros Formation, Ischigualasto Provincial Park, San Juan, Argentina. Publicación Especial de la Asociación Palaeontológica Argentina, 9. 17-33. DOI: https://doi.org/10.1016/S0070-4571(09)06107-X

26. *Mikulas R. (1999). Joint occurences of body- and trace-fossil communities (Ordovican, Barrandian area, Czech Republic). Journal of Czech Geological Society, 44/1-2. 69-78.*
27. *Minter N., Buatois L., Mangano M. (2016). The Conceptual and Methodological Tools of Ichnology.*
28. *Seilacher A (1967). Bathymetry of trace fossils. Mar Geol 5. 413–428. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-017-9600-2_1*
29. *Uchman, A. (1998). Taxonomy and ethology of flysch trace fossils: a revision of the Marian Ksia¸z˙- kiewicz collection and studies of complementary material. Ann. Soc. Geol. Pol. 68, 105–218.*
30. *Zonneveld J.P., Pemberton S.G. (2003). Ichnotaxonomy and behavioral implications of lingulide-derived trace fossils from the Lower and Middle Triassic of western Canada. Ichnos 10. 25–39. DOI: https://doi.org/10.1080/10420940390238249*

Trace fossils from Serpukhovian (Mississipian) sediments of Mospanivska geological structure (Dniper-Donetsk depression)

Rodion Moiseienko [1,2]
PhD student, Department of Fundamental and Applied Geology,
[1] V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine;
Junior Researcher, [2] Complex core research laboratory,
JSC "UkrGasProduction", Kharkiv, Ukraine

ABSTRACT

Introduction. Exhaustion of large oil and gas deposits leads to exploring smaller geological structures, from which large amount of core cannot be extracted. Therefore, value of trace fossils analysis increases due to necessity of receiving more geological information from less core material. Therefore, new core processing practices must be implemented. The paper is devoted to the study, description and systematization of the trace fossils that have been found in the Serpukhovian stage of Carboniferous system inside of Mospanivska geological structure.

Analysis of previous publications. There are only a few Ukrainian publications, that have been written over past decades, that briefly touch the topic of trace fossils analysis. Such mentions can be found in works of V. Dernov, A. Menasova, A. Matveev and a few others. Last complex work on trace fossils in Ukraine was written over fifty years ago by O. Vyalov. On the contrary, in world sedimentology practice trace fossils analysis doesn't lack attention. Some important publications were made by Seilacher, Ecdale, Bromley, Knaust, Hasiotis and others. The main goal of this publication is to highlight prospects of using trace-fossils analysis as an important aspect of core description.

Material and methods. Full-lenth core from four different wells was used. The scientific search was based on the analysis of literature, as well as own field, laboratory and analytical studies. Trace fossils were described from longitudinal core cutting plains. To create images of trace fossils, core panoramic photographs in white light were done. Systematization of trace fossils was done in accordance with ichnotaxobasis method, described by D. Knaust. For each trace fossil morphology description included orientation, bifurcation, overall form, lining presence or absence, visible sizes and typical cutting projections.

Results and discussion. Lithological composition of the studied beds includes sandstones, siltstones, siliclastic mudstones, thin beds of coal and carbonate mudstones. Taxonomical composition of studied Serpukhovian trace fossils in Mospanivska structure consists of 10 genes. They are Arenicolites, Gastrochaenolites, Lingulichnus, Macaronichnus, Palaeophycus, Planolites, Skolithos, Teichichnus, Thalasinoides and plant roots traces. Such ichnodiversity is considered to be high, which points out to miscellaneous rock deposition conditions, varying from continental to distal-marine. It is highly important to notice, that all described trace fossils, which are typical for sandy nearshore deposits (Arenicolites, Lingulichnus and Skolithos) have producer organisms that can tolerate fluctuations in water salinity. It can be considered as an indicator of salinity fluctuations during sedimentation in nearshore facies.

For every genus high-resolution photos and conceptual schemes are provided. These graphics are considered to be essential as trace fossils appearance in core and in the outcrop, where they were first described, may vary significantly. Every genus is described in terms of its morphology, ethology, palaeoecological value and probable producers. It helped to rule out significant facial diversity and justify subsequent detailed facial analysis of studied Serpukhovian beds.

Keywords*: ichnology, trace fossils, Serpukhovian stage, Dniper-Donetsk depression, lithology, carboniferous system, core research, clastic rocks.*

References

1. *Vyalov O.S. (1966). Trace fossils and their paleontological value. Kyiv, Naukova dumka, 219.*
2. *Gureev Yu. A. (1983). Fossil imprints vital activity of invertebrate animals and their stratigraphical position in succession Upper Precambrian — Lower Cambrian at Middle Dniester area. Fossil Fauna and Flora of Ukraine. Kyiv, Naukova Dumka, 34–39.*
3. *Dernov V., Udovychenko M. (2023). Trace fossils from the Buchak Formation (Lutetian, Eocene) of Luhansk Oblast, Ukraine, and their palaeogeographic significance. Geo&Bio, 24. 106-140. https://doi.org/10.15407/gb2408 [in Ukrainian]*
4. *Matveev A., Kolosova I., Kyrepa Y., Synegubka V., Shomina A. (2017). Paleontological characteristics of Turonian deposits of the western slope of Ukrainian shield. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (47). Kharkiv, 26-37. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2017-47-03*

5. *Menasova A. (2017). Possible origin of Nemiana Simplex Palij imprints. Visnyk of Kyiv national T. Shevchenko University. Geology. 3(78). Kyiv, 6-10. [in Ukrainian]*
6. *Menasova A., Krochak M. (2021). Reconstruction of sedimentary conditions in late Cretatious of kanyvske Prydnistrovya using fossils of basal horizon of Kannyvska formation. Materials of International scientific conference and XL session of Ukrainian paleontological society NAS of Ukraine. Kyiv, 42-44. [in Ukrainian]*
7. *Ohiyenko O., Tymchenko Y., Menasova A. (2021). Trace fossils of Stomatopoda crustaceans in Kyivska formation of Eocene in Zhytomyrshyna. Materials of International scientific conference and XL session of Ukrainian paleontological society NAS of Ukraine. Kyiv 68-69. [in Ukrainian]*
8. *Paliy, V. M. (1976). Remnants of non-skeleton fauna and tracks of vital activity in Upper Precambrian and Lower Cambrian of Podillia. Paleontology and Stratigraphy Upper Precambrian and Lower Cambrian of South-West East European platform. Kyiv, Naukova dumka, 63–77.*
9. *Synegubka V. (2021). Research of Ostracoda fossils from Senoman-Turonian deposits from south-westerm outskirts of Ukrainian shiels (preliminary results). Materials of International scientific conference and XL session of Ukrainian paleontological society NAS of Ukraine. Kyiv, 44-46. [in Ukrainian]*
10. *Bromley R.G. (1996) Trace fossils: biology, taphonomy and applications. Chapman and Hall, London. 361. https://doi.org/10.1017/S0016756897316987*
11. *Bromley R.G., Uchman A, Milàn J. (2009). Rheotactic Macaronich- nus, and human and cattle trackways in Holocene beachrock, Greece: reconstruction of paleoshoreline orientation. Ichnos, (16), 103–117. https://doi.org/10.1080/10420940802470987*
12. *Buatois L.A., Mangano M.G. (2011). Ichnology. Organism-Substrate Interactions in Space and Time. Cambridge University Press, Cambridge. 358. https://doi.org/10.1017/S0016756811001038*
13. *Clifton H.E., Thompson J.K. (1978). Macaronichnus segregatis: a feeding structure of shallow marine polychaetes. J Sediment Petrol, (48), 1293–1302. https://doi.org/10.1306/212f7667-2b24-11d7-8648000102c1865d*
14. *Dashtgard S. & Gingras M. & MacEachern, J. (2012). The potential of trace fossils as tidal indicators in bays and estuaries. Sedimentary Geology, (279), 97-106. https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2011.05.007*
15. *Dernov, V. (2023). Mammillichnis monstrum isp. nov., a new sea anemone trace fossil from the Carboniferous of the Donets Basin, Ukraine. GEO&BIO. 23. 65-76. https://doi.org/10.15407/gb2306*
16. *Droser M. (1991). Ichnofabric of the Paleozoic Skolithos Ichnofacies and the nature and distribution of Skolithos piperock. Palaios (6), 316–325. https://doi.org/10.2307/3514911*
17. *Ekdale A., Bromley R. (2003). Paleoethologic interpretation of complex Thalassinoides in shallow-marine limestones, Lower Ordovician, southern Sweden. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, (192), 221–227. https://doi.org/10.1016/S0031-0182(02)00686-7*
18. *Ekdale A., Mason T. (1988). Characteristic trace-fossil associations in oxygen-poor sedimentary environments. Geology, (16(8)), 720-723. https://doi.org/10.1130/0091-7613(1988)016<0720:CTFAIO>2.3.CO;2*
19. *Garcia-Hidalgo J.; Gil-Gil J. (2024). Firmgrounds and hardgrounds in the Coniacian carbonate platform of the Iberian basin: Origin and model for development of omission surfaces in tidal environments. Sedimentary geology, (470), 106713. https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2024.106713*
20. *Grosskopf J.F. (2015). Using trace-fossils to determine the role of oceanic anoxic event II on the Cretatious western unterior seaway paleoenvironment. A Dissertation in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. Louisiana State University. 232.*
21. *Hasiotis S., Platt B., Reilly M., Amos K., Lang S., Kennedy D., Todd J., Michel E. (2012). Actualistic Studies of the Spatial and Temporal Distribution of Terrestrial and Aquatic Organism Traces in Continental Environments to Differentiate Lacustrine from Fluvial, Eolian, and Marine Deposits in the Geologic Record. https://doi.org/10.1306/13291400M953457*
22. *Knaust D., Bromley R.G. (eds). (2012). Trace Fossils as Indicators of Sedimentary Environments. Developments in Sedimentology, (64), 924. https://doi.org/10.1017/S0016756813001118*
23. *Knaust D. (2017) Atlas of Trace Fossils in Well Core: Appearance, Taxonomy and Interpretation. Springer International Publishing, Stavanger, 209. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49837-9*
24. *Kraus M.J., Hasiotis S.T. (2006) Significance of different modes of rhizolith preservation to interpreting paleoenvironmental and paleo- hydrologic settings: examples from Paleogene paleosols, Bighorn Basin, Wyoming, U.S.A. J Sediment Res., (76), 633–646. https://doi.org/10.2110/jsr.2006.052*
25. *Melchor R.N., Bellosi E., Genise J.F. (2003). Invertebrate and vertebrate trace fossils from a lacustrine delta: the Los Rastros Formation, Ischigualasto Provincial Park, San Juan, Argentina. Publicación Especial de la Asociación Palaeontológica Argentina, (9), 17-33. https://doi.org/10.1016/S0070-4571(09)06107-X*
26. *Mikulas R. (1999). Joint occurences of body- and trace-fossil communities (Ordovican, Barrandian area, Czech Republic). Journal of Czech Geological Society, (44/1-2), 69-78.*
27. *Minter N., Buatois L., Mangano M. (2016). The Conceptual and Methodological Tools of Ichnology.*
28. *Seilacher A (1967). Bathymetry of trace fossils. Mar Geol 5. 413–428. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9600-2_1*
29. *Uchman, A. (1998). Taxonomy and ethology of flysch trace fossils: a revision of the Marian Ksia¸z˙- kiewicz collection and studies of complementary material. Ann. Soc. Geol. Pol., (68), 105–218.*
30. *Zonneveld J.P., Pemberton S.G. (2003). Ichnotaxonomy and behavioral implications of lingulide-derived trace fossils from the Lower and Middle Triassic of western Canada. Ichnos (10), 25–39. https://doi.org/10.1080/10420940390238249*

Received 16 July 2025
Accepted 27 October 2025

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-07
УДК 550.4:544.2

Надійшла 4 липня 2025 р.
Прийнята 4 жовтня 2025 р.

Комп'ютерне фізико-хімічне моделювання поведінки водню та метану у водних розчинах

Надія Словотенко [1]
к. геол. н., ст. наук. співробітник відділу інноваційних геологічних проєктів,
[1] Львівське відділення УкрНДІгаз, Львів, Україна,
e-mail: nslovotenko@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-9569-417X;
Уляна Борняк [2]
к. геол. н., доцент кафедри мінералогії, петрографії і геохімії імені Ореста Матковського,
[2] Львівський національний університет імені Івана Франка, Львів, Україна,
e-mail: u.bornyak@ukr.net, https://orcid.org/0000-0003-1214-4821

У статті представлені результати числового фізико-хімічного моделювання розчинності водню і метану у програмному пакеті GEM-Selector (GEMS), обчислювальний алгоритм якого ґрунтуються на принципі мінімізації вільної енергії Гіббса. Це зручний числовий інструмент для дослідників, що дозволяє концентрувати увагу на фізико-хімічних взаємодіях між гетерогенними фазами, передбачати поведінку систем, фізичний експеримент на якими дуже дорогий або неможливий. Завдяки детальному моделюванню поведінки твердих, рідких (водних) та газових фаз програмний пакет забезпечує точний опис складних природних геохімічних систем. Вони можуть включати багато неідеальних твердих або рідких розчинів, газових сумішей або неідеальних газоподібних рідин. GEMS, разом з пов'язаними з ним термодинамічними базами даних, є важливими науковим інструментом для термодинамічного моделювання геохімічних процесів, включаючи, серед іншого, взаємодії твердих речовин, газу та рідини, розчинення – осадження мінералів, кінетику реакцій, процеси окислення – відновлення та сорбції. Мета дослідження: визначити особливості поведінки водню і метану в природних розчинах. Умови моделювання включали: температурний інтервал, який охоплював значення від 10 до 240 °С, і параметри тиску від 1 до 1751 бар. Результати дослідження включають насичення газами розчинів електролітів змінної солоності (0 і 10 ваг. % NaCl екв.), які продемонстровані за допомогою діаграм мольфракції, помноженої на 100 %, в залежності від температури й тиску. Здійснено порівняння результатів насичення розчинів різної солоності воднем та метаном для моделі із гідростатичним тиском та геотермічним градієнтом 25 °С/км. Розчинність водню і метану у водних натрій-хлоридних розчинах змінюється з температурою і тиском та зростає з ростом температури й тиску. Тиск має більше значення, ніж температура. На великих глибинах за великих значень тиску (більше 200 бар) водень краще розчиняється у водних розчинах, ніж метан, а у близько поверхневих умовах розчинення водню скорочується.

Ключові слова: *водень, метан, водний розчин, розчинність водню, розчинність метану, насичення газами.*

Як цитувати: Словотенко Надія, Борняк Уляна (2025). Комп'ютерне фізико-хімічне моделювання поведінки водню та метану у водних розчинах. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*, (63), 95-101. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-07

In cites: Slovotenko Nadiya, Bornyak Ulyana (2025). Computer physicochemical modeling of hydrogen and methane behavior in aqueous solutions. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 95-101. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-07 [in Ukrainian]

Вступ. На сьогоднішній день природний водень викликає все більшу зацікавленість у наукової спільноти в зв'язку зі зростанням його споживання у народному господарстві та його потенційної ролі замінника традиційних вуглеводневих джерел енергії. Єдиним побічним продуктом згоряння водню є вода, водень окиснюється без виділення CO_2. Водень використовують у нафтопереробній (очищення нафти і перетворення важких нафтових фракцій на більш легкі продукти), хімічній (виробництво аміаку і метанолу), металургійній (пряме відновлення заліза), видобувній промисловості, транспорті, енергетиці [1]. Водень можна перетворювати в електрику за допомогою паливних елементів і зберігати у великій кількості як будь-який газоподібний компонент. У промисловості водень відіграє важливу роль хімічної сировини, а також стає ключовим енергоносієм та паливом для транспорту [1, 2].

Після публікації про відкриття та розробку родовища природного водню Буракебугу в Малі в 2018 році [3] різко зростала хвиля наукових публікацій і повідомлень про проекти дослідження та пошуків [4, 5]. Отже, на нашу думку, модель функціонування водневої системи заслуговує ретельної уваги і є надзвичайно актуальною.

Водень генерується на глибинах 5-12 км шляхом гідротермальної взаємодії із породами, що містять закисне залізо та внаслідок радіолізу води [6, 7, 8]. Головними геологічними реакторами, що генерують молекулярний водень, є: 1) зони формування океанічної літосфери, де основний об'єм водню утворюється в процесах серпентинізації; 2) кристалічний фундамент континентальної кори, де працюють механізми гідротермального окиснення та радіолізу. Розрахунки показують приблизну рівність потоків водню, що генеруються обома реакторами [9].

© Словотенко Надія, Борняк Уляна, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Емісія природнього водню через континентальну поверхню відмічена в численних локаціях [3, 5, 10, 11, 12]. Генерація водню при радіолізі контролюється тільки вмістом радіоактивних ізотопів з α-розпадом [7, 8]. Утворення молекул водню в метаболізмі бактерій (біогенний водень) звичайно компенсується їх поглинанням іншими, сульфат-редукуючими, бактеріями і можливий баланс цих процесів скоріше спрямований в бік поглинання водню [13, 14].

Початкова міграція водню відбувається в складі водного розчину. Транспортування водню із подальшою акумуляцією можливе тільки в підземних водоносних горизонтах. Розчинність водню в водних розчинах теоретично та експериментально обґрунтована [15]. Гетерогенізація водного розчину визначається як *P-T* умовами, так і насиченням його газами та фоновим сольовим складом [15, 16].

Розчинність водню мінімальна при температурі 55-57 °С і зростає як при пониженні, тиску так і при підвищенні температури. Збільшення загального тиску, згідно закону Генрі, сприяє зростанню концентрації водню в розчині. На розчинність водню впливає зростання мінералізації розчину, із ростом концентрації електролітів в розчині рівноважна концентрація водню знижується і відбувається дегазація – перехід водню у газову фазу. Рівноважна розчинність водню в слабоконцентрованих водних розчинах із глибиною (за температурного градієнту 30°С/км та гідростатичного тиску) розрахована в [16].

Критичною глибиною в такій системі є 1.5-2 км. На цій глибині різко зменшується концентрація розчиненого у воді водню і починається активна дегазація водню – перехід у газову фазу [16]. Глибина дегазації зростає із збільшенням концентрації електролітів у підземних водах [15]. На менших глибинах водень буде переміщуватися в двофазовому потоці.

Проблема, що стає перед нами – взаємодія потоків водню із існуючими покладами переважно метанового складу. Розуміння механізмів та динаміки цих процесів потребує аналізу складної багато-фазової фізико-хімічної системи, що може бути реалізована шляхом комп'ютерного фізико-хімічного моделювання поведінки водню та метану в сучасних програмних пакетах.

Мета дослідження: визначити особливості поведінки водню і метану в природних розчинах, а саме, за допомогою числового фізико-хімічного моделювання встановити точки насичення воднем і метаном розчинів відмінної солоності при різних температурах і тисках.

Методика досліджень. GEM-Selektor (GEMS) – це програмний пакет, створений групою під керівництвом Д. Кулика, програмний пакет поширюється Інститутом Пауля Шеррера (Paul Scherrer Institute) [17, 18, 19, 20, 21].

Обчислювальні алгоритми ґрунтуються на принципі мінімізації вільної енергії Гіббса (Gibbs energy minimization – GEM), та дозволяє інтерактивне термодинамічне моделювання гетерогенних водних геохімічних систем, особливо тих, що включають метастабільність і дисперсність мінеральних фаз, рівноваги твердого розчину та водного розчину та адсорбцію/іонний обмін. Включає вбудовану (за замовчуванням) термодинамічну базу даних як у термохімічному, так і в реакційному форматах.

Методи прямої мінімізації енергії Гіббса, що застосовуються в GEMS мають численні переваги для реалістичного геохімічного моделювання таких систем, як розчин-порода. Можливо моделювати дуже складні геохімічні системи з багатьма фазами – неідеальними розчинами при зміні температури і тиску, забезпечуючи при цьому точні результати, відмінну точність балансу маси.

Для моделювання досліджуваної системи нами використовувалася термодинамічна база даних MINES [22, 23], яка створена та підтримується професором Олександром Гізі (Alexander Gysi) з Бюро геології та мінеральних ресурсів, Нью-Мексико, США. MINES – це термодинамічний набір даних, підготовлений для моделювання магматично-гідротермальних процесів рудоутворення. Набір даних включає найновіші експериментальні дані для мінералів, що містять рідкісно земельні елементи (Rare Earth Elements, *REE*), і дані для породоутворюючих мінералів із наборів даних [24, 25].

Моделювання насичення розчинів воднем і метаном. Під час розрахунків використовували рівняння стану Peng-Robinson-Stryjek-Vera для газів, оскільки розраховували умови від низьких до високих температур і тисків [19].

Температурний інтервал моделювання був обмежений значеннями від 10 до 240 °С, тиск змінювали від 1 бар до 1751 бар.

Солоність розчину розраховували за формулою частки:

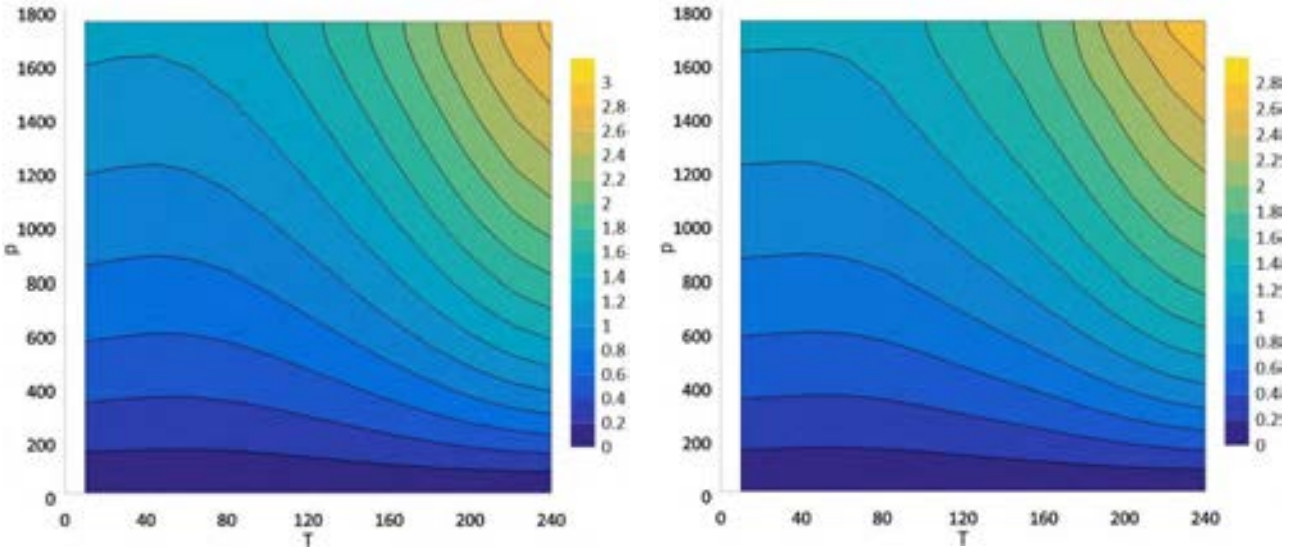
$$W = \frac{m_{\text{рр}}}{m_{\text{р}} + m_{\text{рр}}} 100\%, \qquad (1)$$

де W – частка; $m_{\text{рр}}$ – маса розчиненої речовини; $m_{\text{р}}$ – маса розчину. Тому для створення розчину потрібної солоності (0 та 10 ваг. % NaCl екв.) в систему додавалась відповідна кількість грам NaCl, а саме 111 г на 1 кг розчину для того, щоби встановити солоність 10 ваг. % NaCl екв. Спочатку розрахунки велися для системи з нульовою солоністю, далі окремо для системи з підвищеною солоністю (10 ваг. % NaCl екв.).

Для моделювання розчину, врівноваженого з природним пісковиком, взято аналіз пісковика у

формі оксидів: SiO_2 92.92 %, Al_2O_3 2.721 %, Fe_2O_3 2.42 %, CaO 0.173 %, MgO 0.533 %, K_2O 1.08 %, Na_2O 0.05% [26]. Значення у відсотках перераховані у грами і введені у програму в рівновазі з 1 кг води, як початковий склад системи (плюс NaCl для розчину підвищеної солоності). Після урівноваження з водним розчином модельований пісковик набув наступний мінеральний склад: кварц 86.83 г, мікроклін 3.73 г, мусковіт 3.44, гематит 2.41 г, альбіт 2.31 г, клинохлор 1.46 г. Модельована система – розчин (різної солоності: 0 та 10 ваг. % NaCl екв.), урівноважений з пісковиком вказаного складу – дублювалася при різних температурах від 10 °С до 240 °С і тиску 1751 бар з кроком в 10 °С та 50 бар. Кожен з таких порізному нагрітих варіантів розчину (10°С, 20 °С, 30 °С, 40 °С, … 240 °С) насичувався воднем за допомогою опції *Process* у програмному пакеті GEMS шляхом титрування. Титрування велося з малим кроком 0.02 г для того, щоби знайти точку насичення воднем модельованого розчину за даних *P-T* параметрів. У кожному випадку, за конкретної температури, потрібні були різні кількості газу, оскільки насичення розчинів залежить від розчинності газу, на яку, в свою чергу, впливає температура і тиск, *pH* та іонна сила розчину [27]. Потрібно було знайти саме той варіант, де відбувалося насичення (початок виділення газу).

Далі результат титрування – розчин, насичений газом, підлягав новому «процесу», а саме, досягнення рівноваги при зміні тиску від 1751 бар до 1 бар. Двадцять чотири варіанти розчинів певної температури (10°С, 20 °С, 30 °С, 40 °С, … 240 °С) підлягали покроковій зміні тиску. Це також досягалося за допомогою опції *Process*, але тут за умов сталої температури вже змінювали тільки значення тиску. На виході нас цікавив результат – моль-фракція H_2. Саме її, помножену на 100 %, далі використовували для побудови діаграми насичення газом (рис. 1).



а *б*

Рис. 1. Насичення розчинів воднем (а) для солоності 0 ваг. % NaCl екв. та (б) для солоності 10 ваг. % NaCl екв. На кожній шкалі (справа від діаграми) показано мольну фракцію H_2, помножену на 100 % / Fig. 1. Hydrogen saturation of solutions (a) for salinity 0 wt. % NaCl equ. and (b) for salinity 10 wt. % NaCl equ. Each scale (to the right of the diagram) shows the mole fraction of H_2 multiplied by 100 %

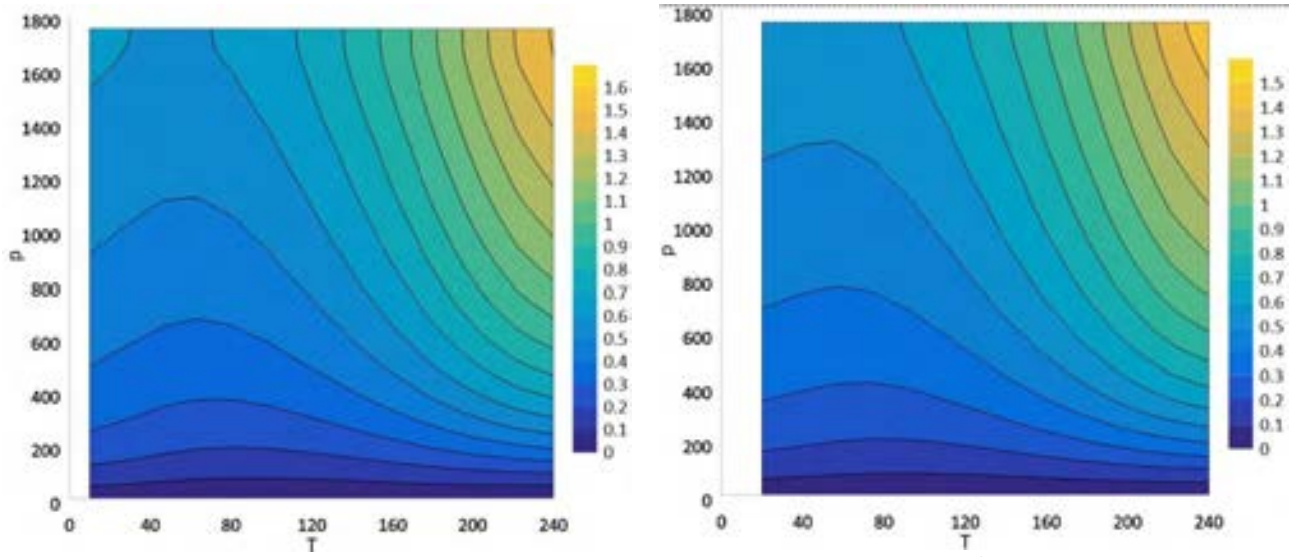
Точно такі дії були застосовані для насичення модельного розчину метаном за допомогою програмного пакету GEM-Selektor. Використовували попередньо створений модельний розчин, урівноважений з пісковиком, для пошуку точок насичення метаном. Алгоритм розрахунку для одержання мольфракції CH_4 не відрізнявся від попереднього і включав два варіанти розчинів, урівноважених з пісковиком, зі значеннями солоності 0 та 10 ваг. % NaCl екв. Насичення здійснювалось на базі попередніх проектів з такими ж інтервалами температур і тисків. Єдина відмінність полягала у тому, що для досягнення насичення модельного розчину метаном, потрібно було додавати дещо більші кількості газу, ніж у випадку водню.

Одержані результати. Результати пошуку точок насичення системи воднем за умов різної температури (від 10 до 240 °С) і тиску від 1 до 1751 бар для розчинів з солоністю 0 та 10 % NaCl екв. графічно представлені на діаграмах *а* і *б* відповідно (рис. 1). Градація відтінків демонструє мольфракцію водню, помножену на 100 (далі в тексті ×100). У випадку нульової солоності вона змінюється нелінійно від 0 при тисках нижче за 200 бар до 3,2 при високих тисках і температурах. Солоність у 10 % NaCl екв. обмежує значення водневої мольфракції (×100) від 0 до 3.

В обох випадках за температур 100 °С і нижче, ми спостерігаємо, що мольфракція (×100) не перевищує значення 1.2 у всьому діапазоні зміни тиску. Таке саме значення мольфракції (×100) близько 1.2 спостерігається при тисках 600 бар і температурах 240 °С. Зростання тиску до максимальних значень 1800 бар і температури не вище 100 °С також не змінює мольфракцію (×100) і залишає на рівні 1.2. Одночасне підвищення температури й тиску до максимальних значень збільшує насиченість воднем розчину, відповідно величина мольфракції (×100) різко зростає до 3.

Наступні діаграми (рис. 2 *а*, *б*) відображають результати титрування розчину, врівноваженого з пісковиком, газом метаном. Значення солоності електролітів 0 ваг. % NaCl екв. (рис. 2 *а*) та 10 ваг. % NaCl екв. (рис. 2 *б*). Під час титрування для насичення метаном потрібно було дещо більша кількість газу. На обох рисунках 1 і 2 ми бачимо, що за умов високих тисків та температури насичення воднем (рис. 1) і метаном (рис. 2) сильно зростає. Результати графічних побудов моделювання продемонстровані на рисунку 2 *а*, *б*, показують, що картина насичення метаном цілком подібна до результатів насичення воднем (рис. 1). Різниця полягає в тому, що розчин менше насичується метаном, ніж воднем, а мольфракція (×100) не перевищує значень 1.7 у випадку нульової солоності та 1.6 за умов підвищеної солоності (10 ваг. % NaCl екв.).

Для порівняння результатів чисельного моделювання насичення розчинів змінної солоності воднем і метаном побудовано відповідну діаграму в координатах тиск – мольфракція, помножена на 100 % (рис. 3). Щодо зміни солоності, то вона не створює значного ефекту на насичення розчинів газами. Звичайно, тут включається ефект



а *б*

Рис. 2. Насичення водних розчинів метаном (а) для солоності 0 ваг. % NaCl екв. та (б) для солоності 10 ваг. % NaCl екв. На кожній шкалі (справа від діаграми) показано мольну фракцію CH_4, помножену на 100 % /

Fig. 2. Saturation of aqueous solutions with methane (a) for salinity 0 wt. % NaCl equ. and (b) for salinity 10 wt. % NaCl equ. Each scale (to the right of the diagram) shows the mole fraction of CH_4 multiplied by 100 %

висолювання, тобто значення насичення газами дещо нижчі за умов підвищеної солоності (рис. 3). Водень більше насичує водний розчин, ніж метан (рис. 3), при тисках нижче 200 бар ця залежність обернена, але відхилення незначне.

Висновки. Наші дослідження дозволили знайти точки насичення розчинів різної солоності (0 і 10 % NaCl екв.) й температури (10 – 240 °С) воднем й метаном в інтервалі тиску 1-1751 бар за допомогою програмного пакету GEM-Selektor.

Розчинність водню і метану у водних натрій-хлоридних розчинах змінюється з температурою і тиском та зростає з ростом температури й тиску. Під час розчинення газів тиск відіграє більше значення, ніж температура.

Суміш водню і метану, урівноважена з формаційним розчином буде містити більше водню, ніж метану при значеннях тиску вище 200 бар, та більше метану, ніж водню при тисках нижче 200 бар. Тобто на великих глибинах за великих значень тиску водень краще розчиняється у водних розчинах, ніж метан, а у близько поверхневих умовах розчинення водню скорочується.

Подяки. Аналіз і числове моделювання проведено в рамках науково-дослідної тематики: «Дослідження генераційного потенціалу, міграції та накопичення в осадових комплексах Західного

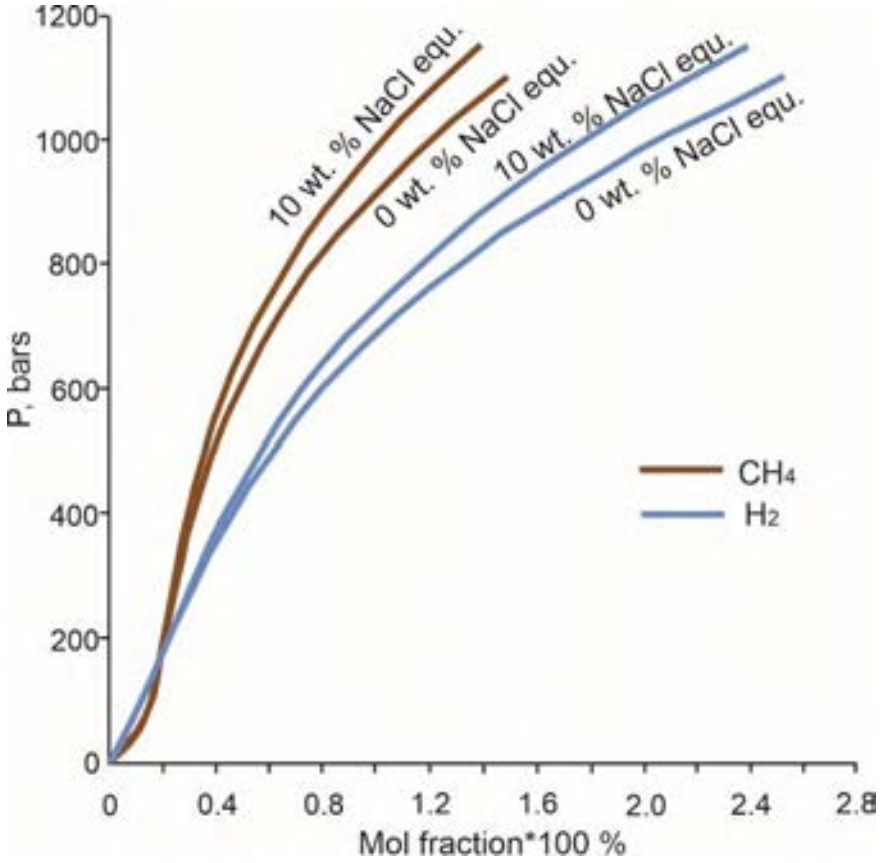


Рис. 3. Порівняння результатів насичення розчинів різної солоності для водню й метану для моделі із гідростатичним тиском та геотермічним градієнтом 25 °С/км

Fig. 3. Saturation results comparison of the different salinities solutions for hydrogen and methane for a model with hydrostatic pressure and a geothermal gradient of 25 °C/km

нафтогазоносного регіону (Волино-Поділля, Передкарпатський прогин) скупчень природного водню та розроблення рекомендацій щодо їх вивчення та можливості промислового освоєння» (2023-2024 рр.), шифр НДР 61.0000608.

References

1. *International Energy Agency. (2021). Global hydrogen review 2021 (136).* https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021
2. *International Energy Agency. (2019). The future of hydrogen: Seizing today's opportunities (Report prepared for the G20, Japan; 203). International Energy Agency.*
3. *Prinzhofer, A., Tahara Ciss, S. C., & Diallo, A. B. (2018). Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali). International Journal of Hydrogen Energy, 43, 19315–19326.* https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.193
4. *Guelard, J., Beaumont, V., Guyot, F., Pillot, D., Jezequel, D., Ader, M., Newell, K., & Deville, E. (2017). Natural H_2 in Kansas: Deep or shallow origin? Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 18(5), 1793–2008.* https://doi.org/10.1002/2016GC006544
5. *Prinzhofer, A., Moretti, I., Francolin, J., Pacheco, C., D'Agostino, A., Werly, J., & Rupin, F. (2019). Natural hydrogen continuous emission from sedimentary basins: The example of a Brazilian H_2-emitting structure. International Journal of Hydrogen Energy, 44(12), 5676–5685.* https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.119
6. *Gaucher, E. (2020). New perspectives in the industrial exploration for native hydrogen. Elements, 16(1), 8–9.* https://doi.org/10.2138/gselements.16.1.8
7. *Klein, F., Tarnas, J., & Bach, W. (2020). Abiotic sources of molecular hydrogen on Earth. Elements, 16(1), 19–24.* https://doi.org/10.2138/gselements.16.1.19
8. *Parnell, J., & Blamey, N. (2017). Hydrogen from radiolysis of aqueous fluid inclusions during diagenesis. Minerals, 7, 130 (8 p.).* https://doi.org/10.3390/min7080130
9. *Sherwood Lollar, B., Onstott, T. C., Lacrampe-Couloume, G., & Ballentine, C. J. (2014). The contribution of the Precambrian continental lithosphere to global H_2 production. Nature, 516, 379–382.* https://doi.org/10.1038/nature14017
10. *Larin, V. (1993). Hydridic Earth: The new geology of our primordially hydrogen-rich planet. Polar Publishing, 247.*

11. Moretti, I., Brouilly, E., Loiseau, K., Prinzhofer, A., & Deville, E. (2021). Hydrogen emanations in intracratonic areas: New guidelines for early exploration basin screening. Geosciences, 11, 145, 1–28. https://doi.org/10.3390/geosciences11030145
12. Moretti, I., Prinzhofer, A., Françolin, J., Pacheco, C., Rosanne, M., Rupin, F., & Mertens, J. (2021). Long-term monitoring of natural hydrogen superficial emissions in a Brazilian cratonic environment: Sporadic large pulses versus daily periodic emissions. International Journal of Hydrogen Energy, 46, 3615–3628. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.026
13. Gregory, S. P., Barnett, M. J., Field, L. P., & Milodowski, A. E. (2019). Subsurface microbial hydrogen cycling: Natural occurrence and implications for industry. Microorganisms, 7, 53, 14. https://doi.org/10.3390/microorganisms7020053
14. Sugimoto, A., & Fujita, N. (2006). Hydrogen concentration and stable isotopic composition of methane in bubble gas observed in a natural wetland. Biogeochemistry, 81, 33–44. https://doi.org/10.1007/s10533-006-9028-4
15. Lopez-Lazaro, C., Bachaud, P., Moretti, I., & Ferrando, N. (2019). Predicting the phase behavior of hydrogen in NaCl brines by molecular simulation for geological applications. Bulletin de la Société Géologique de France, 190(7), 1–15. https://doi.org/10.1051/bsgf/2019008
16. Bazarkina, E., Chou, I.-M., Goncharov, A., & Akinfiev, N. (2020). The behavior of H_2 in aqueous fluids under high temperature and pressure. Elements, 16(1), 33–38. https://doi.org/10.2138/gselements.16.1.33
17. APGYSI. (2021). A tutorial for geochemical modeling of fluid–rock interaction using GEM-Selektor and the MINES thermodynamic database. https://apgysi.github.io/gems-mines-tutorial/
18. Paul Scherrer Institute. (2019). GEM-Selektor overview. https://gems.web.psi.ch/overview.html
19. Paul Scherrer Institute. (2023). GEM software (GEMS). https://gems.web.psi.ch/
20. Kulik, D. A., Wagner, T., Dmytrieva, S. V., Kosakowski, G., Hingerl, F. F., Chudnenko, K. V., & Berner, U. R. (2013). GEM-Selektor geochemical modeling package: Revised algorithm and GEMS3K numerical kernel for coupled simulation codes. Computational Geosciences, 17, 1–24. https://doi.org/10.1007/s10596-012-9310-6
21. Wagner, T., Kulik, D. A., Hingerl, F. F., & Dmytrieva, S. V. (2012). GEM-Selektor geochemical modeling package: TSolMod library and data interface for multicomponent phase models. Canadian Mineralogist, 50(5), 1173–1195. https://doi.org/10.3749/canmin.50.5.1173
22. New Mexico Institute of Mining and Technology. (2024). MINES: GEMS tutorials. https://geoinfo.nmt.edu/mines-tdb/tutorials/
23. New Mexico Institute of Mining and Technology. (2024). MINES: Thermodynamic database. https://geoinfo.nmt.edu/mines-tdb/
24. Holland, T. J. B., & Powell, R. (1998). An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest. Journal of Metamorphic Geology, 16(3), 309–343.
25. Robie, R. A., & Hemingway, B. S. (1995). Thermodynamic properties of minerals and related substances at 298.15 K and 1 bar (10^5 pascals) pressure and at higher temperatures (U.S. Geological Survey Bulletin 2131, 470. https://doi.org/10.3133/b2131
26. Fořt, J., Pavlík, Z., Ďurana, K., & Černý, R. (2015). Effect of sandstone anisotropy on its heat and moisture transport properties. Materials Science (Medžiagotyra), 21(3), 455–459. https://doi.org/10.5755/j01.ms.21.3.7202
27. Etiope, G. (2015). Natural gas seepage: The Earth's hydrocarbon degassing. Springer International Publishing, 203. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14601-0

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу
Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Computer physicochemical modeling of hydrogen and methane behavior in aqueous solutions

Nadiya Slovotenko [1]
PhD (Geology), Senior Researcher,
Department of Innovative Geological Projects,
[1] Lviv Branch of UkrNIIgaz, Lviv, Ukraine;
Ulyana Bornyak [2]
PhD (Geology), Associate Professor of the
Orest Matkovsky Department of Mineralogy, Petrography and Geochemistry,
[2] Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine

Introduction. Increasing interest of the scientific community to the natural hydrogen growths due its potential role as a substitute for traditional hydrocarbon energy sources. The initial migration of hydrogen occurs in the aqueous solution. Hydrogen transportation with subsequent accumulation is possible only in the underground aquifers. The hetero-

genization of the aqueous solution is determined by both *P-T* conditions and its saturation with gases and background salt composition. In our opinion, the model of the functioning of the hydrogen system deserves careful attention and is extremely relevant. The problem facing us is the interaction of hydrogen flows with existing deposits of predominantly methane composition. Understanding the mechanisms and dynamics of these processes requires the analysis of a complex multi-phase physicochemical system, which can be implemented by the computer physicochemical modeling of the hydrogen and methane behavior in modern software packages.

The purpose of the study: to determine behavior features of the hydrogen and methane in the natural solutions of different salinities, namely, to establish the saturation points of hydrogen and methane solutions at different temperatures and pressures using numerical physicochemical modeling.

Research methodology. GEM-Selektor (GEMS) is a software package created by a group led by D. Kulik, the software package is distributed by the Paul Scherrer Institute. The computational algorithms are based on the principle of Gibbs energy minimization (GEM), and allow interactive thermodynamic modeling of heterogeneous aqueous geochemical systems. Includes a built-in thermodynamic database in both thermochemical and reaction formats. To model the studied system, we used the MINES thermodynamic database, which was created and maintained by Professor Alexander Gysi from the Bureau of Geology and Mineral Resources, New Mexico, USA.

Results. The modeled system was a solution (of different salinities: 0 and 10 wt. % NaCl eq.), equilibrated with a sandstone of the specified composition. It was duplicated at different temperatures from 10 °C to 240 °C and a pressure of 1751 bar with a step of 10 °C and 50 bar. The simulation conditions included: a temperature interval from 10 to 240 °C, and pressure parameters from 1 to 1751 bar. The results of the study include the gas saturation of electrolyte solutions of variable salinity (0 and 10 wt. % NaCl equiv.), which are demonstrated using mole fraction diagrams multiplied by 100%, depending on temperature and pressure. The saturation results of the different salinities solutions with hydrogen and methane are compared for a model with hydrostatic pressure and a geothermal gradient of 25 °C/km.

Conclusions. The solubility of hydrogen and methane in aqueous sodium chloride solutions varies with temperature and pressure and increases with increasing temperature and pressure. During the dissolution of gases, pressure plays a greater role than temperature. A mixture of hydrogen and methane equilibrated with the formation solution will contain more hydrogen than methane at pressures above 200 bar, and more methane than hydrogen at pressures below 200 bar. At great depths and under high pressure hydrogen dissolves better in aqueous solutions than methane, and in near-surface conditions hydrogen dissolution is reduced.

Keywords*: hydrogen, methane, aqueous solution, hydrogen solubility, methane solubility, gas saturation.*

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 4 July 2025
Accepted 4 October 2025

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-08
УДК 622.234.5:553.981(477.54)

Надійшла 20 вересня 2025 р.
Прийнята 25 жовтня 2025 р.

Динамічні зміни у масиві гірських порід в процесі гідророзриву пласта (на прикладі Західно-Хрестищенської брахіантиклінальної структури)

Антон Ткачов [1]
аспірант, кафедра фундаментальної та прикладної геології,
[1] Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,
e-mail: tkachev.antoniy@gmail.com, https://orcid.org/0009-0007-8215-1847;
Ольга Сердюкова [1]
старший викладач, кафедра фундаментальної та прикладної геології,
e-mail: serd3517@gmail.com, http://orcid.org/0000-0002-8946-0243

Гідророзрив пласта (ГРП) є ключовою технологією для підвищення продуктивності нафтових та газових свердловин шляхом створення штучних зон розущільнення у низькопроникних та виснажених колекторах. Збільшення об'єму порово-тріщинного простору в масивах гірських порід залежить від взаємодії геологічних, технологічних, геомеханічних та хімічних факторів. які визначають ефективність цього процесу. Динамічні зміни, що відбуваються в породах внаслідок ГРП, розглянуто на прикладі Західно-Хрестищенської брахіантиклінальної структури – складки субширотного простягання у відкладах верхнього карбону – нижньої пермі. Вона знаходиться в зоні розвитку у потужній осадовій товщі солянокупольних структур південно-східної частини Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ). Досліджено геологічні чинники, що впливають на зміну геологічного середовища під час гідророзриву пласта на прикладі Західно-Хрестищенського газоконденсатного родовища (ГКР). Проведено комплексний аналіз геологічної будови, гідродинамічних і сейсмічних даних. Побудовано модель формування порово-тріщинного простору в результаті проведення ГРП. На прикладі Західно-Хрестищенського газоконденсатного родовища вперше проведено комплексний аналіз впливу різних факторів на зміну геологічного середовища у східній частині ДДЗ в процесі гідророзриву пласта і побудовано схематичну модель динамічних змін у геологічному середовищі внаслідок проведення ГРП. Побудовано модель формування тріщинного простору у результаті проведення ГРП. Визначено динамічні зміни, які відбуваються у масивах гірських порід внаслідок проведення гідророзриву пласта. Визначено індекси крихкості порід-колекторів об`єкту досліджень. Розглянуто структурно-тектонічні, літолого-стратиграфічні та гідродинамічні фактори впливу гідророзриву пласта на осадові породи пізнього кам'яновугільного комплексу.

***Ключові слова**: Дніпровсько-Донецька западина (ДДЗ), щільні колектори, гідророзрив пласта (ГРП), динамічні зміни, продуктивні пласти, зона розущільнення, порово-тріщинний простір, скупчення вуглеводнів, крихкість колекторів.*

Як цитувати: Ткачов Антон, Сердюкова Ольга (2025). Динамічні зміни у масиві гірських порід в процесі гідророзриву пласта (на прикладі Західно-Хрестищенської брахіантиклінальної структури). *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*, (63), 102-112. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-08

In cites: Tkachov Anton, Serdiukova Olga (2025). Tectonophysical changes in rock mass during hydraulic fracturing (based on the example of the West-Khrestishche brachyanticline structure). *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 102-112. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-08 [in Ukrainian]

Вступ. Гідророзрив пласта – технологія для створення штучної зони розущільнення у масиві гірських порід з метою формування компактних скупчень вуглеводнів. Внаслідок цього в масиві відбуваються кардинальні динамічні зміни, пов'язані з виникненням систем тріщин і пор у продуктивних теригенних товщах.

Тріщино-поровий простір, який утворюється в процесі дії водоемульсійного розчину під високим тиском на масив гірських порід, утворює компактну зону розущільнення, в якій накопичується вуглеводні [19]. За наявності або відсутності в продуктивних пластах вже існуючих літогенних і тектоногенних тріщин та пор швидкість формування зони розущільнення може бути відповідно прискорена або уповільнена. Це обумовлюється зміною вектору потоку рідини в існуючі тріщини, що зменшує ударно-руйнуючий ефект ГРП [7, 11, 24].

Властивості рідини гідророзриву суттєво впливають на режим розвитку тріщини. В'язкість технологічної рідини залежить як від її молекулярної маси, так і концентрації полімеру, який знаходиться в ній. Використану рідину можна вилучати з тріщинного простору шляхом проведення колтюбінгу у разі, якщо після процесу гідророзриву, її в'язкість різко знизиться [7].

Завдяки низькій вартості, високій продуктивності, термостійкості та простоти у використанні, полімерні рідини на водній основі широко використовуються для гідророзриву пласта [7, 23, 24].

Методи ініціювання вертикальних і горизонтальних руйнувань були досліджені авторами в польових та лабораторних та умовах. Отримані результати підтверджують висновки інших дослідників [24] і дозволяють визначити основні фактори і процеси руйнування масиву гірських порід в процесі ГРП.

© Ткачов Антон, Сердюкова Ольга, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Історія та аналіз попередніх досліджень. Застосування гідророзриву пласта є одним із методів інтенсифікації видобування вуглеводнів, які широко застосовуються у світовій нафтогазовидобувній практиці [6, 7, 9]. Глибокі шари земної кори зазнають величезних геостатичних тисків через вагу геологічних мас, так і геодинамічних навантажень завдяки постійним тектонічним напруженням в масивах гірських порід [2,15,20].

Структура осадових порід в басейнах седиментації характеризується суттєвим зниженням проникності колекторів з глибиною через звуження порово-тріщинного простору, що робить розробку глибоких горизонтів палеозою надзвичайно складним та дороговартісним завданням [3, 15].

Гідророзрив пласта (англ. – фрекінг) використовується з 1866р. Сучасні дослідження з гідравлічного створення тріщин в породах були проведені в США наприкінці 1940-х років [21]. У 1947 р. компанія Stanolind Oil and Gas здійснила перший експериментальний ГРП у родовищі Хьюготон (Канзас), а вже у 1949р. компанія Halliburton провела першу комерційну операцію, що поклала початок промисловому застосуванню цієї технології.

У 1950–1960-х роках США стали лідером у впровадженні ГРП у низькопроникних колекторах, зокрема в пісковиках і карбонатах Техасу та Оклахоми. Технологія швидко поширилася на інші регіони Північної Америки з розвитком горизонтального буріння, що давало можливість набагато збільшити об'єми штучних зон розущільнення. У 1990-х роках комбінація горизонтальних свердловин і багатоступеневого ГРП спричинила «сланцеву революцію», особливо в басейнах Barnett, Marcellus та Eagle Ford [25].

У Великій Британії перші роботи з ГРП датуються початком 1990-х. У 1993р. було проведено стимуляцію газоносних пісковиків пермського віку на родовищі Елсвік, що стало фактично єдиним довготривалим прикладом використання ГРП у країні [14]. Подальші дослідження зосередилися на Bowland Shale – карбоніфірному сланцевому комплексі Північно-Західної Англії, де геолого-геофізичні дослідження показали значний потенціал для видобутку сланцевого газу.

В Україні ГРП почали застосовувати ще у 1950-х роках. У Бориславі вперше в Україні впроваджено нову технологію інтенсифікації припливу нафти за допомогою гідравлічного розриву пласта. Інтерес до цієї технології зріс у зв'язку з виснаженням високопродуктивних пластів. Сучасні дослідження на українських об'єктах, зокрема на Західно-Хрестищенському газоконденсатному родовищі, демонструють перспективність використання ГРП [13]. На сьогоднішній день в Україні метод гідророзриву пласта застосовують як державні, так і приватні видобувні компанії з метою інтенсифікації видобутку нафти та газу.

У Європі технологія гідророзриву також тестувалася у Польщі (Люблінський басейн), Німеччині (Нижньосаксонський басейн) та інших країнах проте широкого промислового застосування вона не отримала. Основними причинами стали як геологічні фактори (значно нижчий ресурсний потенціал порівняно зі США), так і законодавчі екологічні обмеження [14].

Основним технологічним процесом при розвідці та розробці родовищ газу у слабопроникних породах-колекторах (газ щільних колекторів ценральнобасейнового типу) України вважається гідравлічний розрив пласта. Це обумовлює необхідність проведення аналізу можливих екологічних наслідків, які можуть виникнути внаслідок проведення цих операцій. Зокрема, при недотриманні технології гідравлічного розриву пластів може зазнавати негативного впливу верхня частина гідролітосфери (підземні води, грунти та грунтові води, тощо) [10, 11].

Перші системні уявлення про реакцію геомасивів щільних колекторів ДДЗ на технологічний вплив ГРП ґрунтуються на регіональних узагальненнях будови западини серед яких те, що саме розломні системи інверсійного типу, успадкована сегментація та зони розущільнення визначають анізотропію напружено-деформованого стану порід [2, 3, 14, 17]. Все це безпосередньо впливає на формування порово-тріщинного простору в процесі гідророзриву пласта. Просторова організація цих елементів дає можливість визначити бар'єри висоти тріщин, взаємодії зі стратиграфічними неоднорідностями та ризику прориву технологічних розчинів в покрівлю чи підошву пласта [12].

На Західно-Хрестищенському газоконденсатному родовищі гідророзрив застосовують на покладах горизонтів А-6−8, Г-4−9 у відкладах картамиської світи нижньої пермі – верхнього карбону ($P_1kt – C_3kt$) та араукаритової (C_3ar) світи верхнього карбону.

Колекторами вуглеводнів у Західно-Хрестищенській брахіантикліналі є пісковики та алевроліти. Характеристики продуктивних горизонтів визначають, наскільки стабільно колектор реагує на ГРП. У слабко зцементованих пісковиках може відбуватися значне вкорінення (вдавлення) пропанту в породу, що знижує довготривалу провідність тріщин. У міцно зцементованих товщах для формування тріщинного масиву необхідні більші тиски гідророзриву, що підвищує ризик витоків технологічної рідини у вищі водоносні горизонти або й навіть руйнування соляно-

го кепроку, якщо ГРП проводиться на солянокупольній структурі [8].

Регіональні нафтогеологічні особливості регіону і, зокрема, розподіл колекторів, покришок та пасток, наведено у звіті Геологічної служби США, де ДДЗ розглядається як провінція з широким спектром теригенних резервуарів різного віку [25]. Для оцінки наслідків ГРП це є важливим, бо з літологічними особливостями порід пов'язані їх механічні властивості та суттєво впливає на вектори створених тріщин та їх провідність у багатошарових покладах. Такі узагальнення широко використовуються для геомеханічних моделей і сценаріїв розкриття тріщин у межах ДДЗ [16, 24, 25].

У працях українських дослідників останніх років спостерігається зміщення акценту досліджень від суто проектних моделей до інтегрованого геофізичного супроводу (мікросейсміка, інверсія швидкісних моделей) [12, 13, 15]. Сучасні дослідження систематизують підходи до мікросейсмічного контролю ГРП у низькопроникних теригенних колекторах ДДЗ: оцінювання геометрії тріщинного масиву, кореляція з операційними параметрами закачування, інтерпретація розкриття й провідності тріщин та моделей росту. Для об'єктів типу родовищ ДДЗ це дає інструмент для розрізнення природної тріщинуватості від «свіжих» техногенних розривів, а також дозволяє виявити ризики «перехресного» розкриття сусідніх пластів.

Для слабкосейсмічних районів ДДЗ ключовим стає якісний контроль та геометрія мережі спостережень, оскільки помилки локалізації безпосередньо впливають на оцінку довжини/висоти тріщин і, як наслідок, на інтерпретацію впливу на геологічне середовище (перерозподіл геодинамічних напружень, повторний зсув по дрібних розривах, тощо) [13,25].

Технологічний ракурс вітчизняних робіт акцентує зв'язок режимів закачування та дизайну ГРП з реакцією породного масиву. Поетапне нарощування дебіту, керована концентрація пропанту та підбір агента-носія істотно впливають на стабільність провідності та обмежують небажану висоту тріщини в тонкошаруватих системах. Це безпосередньо пов'язано з мінімізацією ризику контакту з водоносними горизонтами та міжпластовим перетіканням у складних геологічних розрізах ДДЗ [11,18].

Петрофізична неоднорідність є визначальним фактором чутливості колекторів до рідин ГРП. Здебільшого в дослідженнях звертається увага на глинисті компоненти, що спричиняють набухання та звуження тріщини, на ризики вдавлення пропанту в слабко зцементовані пісковики і на зменшення провідності тонкошаруватих теригенних колекторів ДДЗ у часі [4, 10].

У щільних колекторах палеозойських пісковиків критичними є граничні умови проникності – радіус та довжина розущільненої зони, що особливо важливо для тонких, блокованих глинистими прошарками, колекторів [9].

У структурно-тектонічних умовах Дніпровсько-Донецького авлакогену геологорозвідувальні роботи супроводжуються різними ускладненнями та аваріями, серед яких важливу роль відіграють зміни в пластах в процесі проведення ГРП, що обумовлює важливість дослідження авторів [13].

Характеристика продуктивних горизонтів об'єктів досліджень. Західно-Хрестищенська структура, що входить до Кочубіївсько – Олексіївської лінії антиклінальних структур, знаходиться в південно-східній частині Дніпровсько-Донецької западини яка є структурним елементом Дніпровсько – Донецького авлакогену (рис. 1).

Родовище характеризується пластовими та масивно-пластовими покладами газу, які, зазвичай, бувають склепінними, тектонічно екранованими та літологічно обмеженими. Основними газоносними породами є пісковики та алевроліти з пористістю 10-15 % та проникністю 1-334 мД [1, 5].

І-й експлуатаційний об'єкт (C_3^2 – авіловська світа). Верхня частина розрізу світи представлена потужними пластами пісковиків та аргілітів і меншою мірою – алевролітами. Пісковики складають до 30% розрізу. Їх потужність досягає 100 м.

Нижня частина світи представлена чергуваннями аргілітів, темно-сірих алевролітів та численних піщаних пластів, а також тонких прошарків вапняків та вугілля.

ІІ-й експлуатаційний об'єкт (C_3 - араукаритова світа) складена перешаруванням сірих (в нижній частині) та червоних (у верхній) пісковиків, алевролітів, алевролітів з численними тонкими прошарками вапняків в нижній половині розрізу.

Газоносні породи представлені поровими та порово-тріщинними пісковиками та алевролітами (поровими та порово-тріщинними колекторами) з пористістю 12-15% та проникністю 1-334 мД.

На свердловинах Західно-Хрестищенського газоконденсатного родовища технології ГРП у різних модифікаціях використовуються з 2007 р.

Західно-Хрестищенська брахіантикліналь характеризується ускладненою структурою, що обумовлена наявністю чисельних розривних порушень, мікроскладок і фаціальних заміщень у товщі осадових порід (теригенні, карбонатні, галогенні та вуглисті), а також зональним форму-

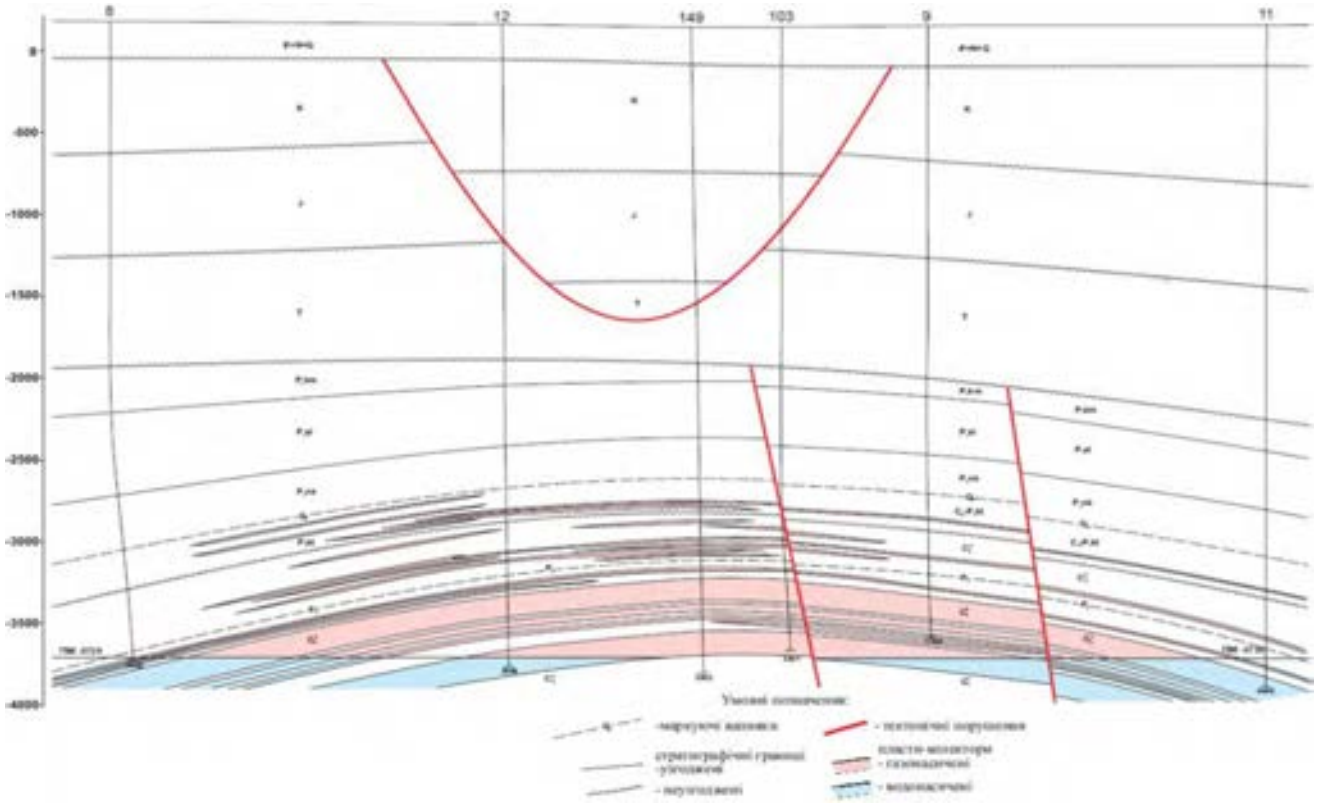


Рис. 1. Геологічний розріз Західно-Хрестищенського родовища (за матеріалами УкрНДІгаз, 2013) /
Fig. 1. Geological section of the West Khrestishchensky field (based on materials from UkrNDIgaz, 2013)

ванням соляних штоків і трансформних зон, що вцілому створює неоднорідне напружено-деформоване середовищеу породах [15], сприятливе для проведення ГРП. Такі структурно-геодинамічні особливості впливають на орієнтацію, висоту та просторовий розвиток штучних тріщин, оскільки вони створюють локальні контрасти σhmin/σHmax (мінімальні та максимальні горизонтальні напруження), що суттєво впливає на вектори розриву пластів різної літологічної приналежності [12, 17]. З урахуванням цих даних, при роботі з колекторами теригенних товщ необхідною є побудова тривимірної (3D) геомеханічної моделі. Це, на думку авторів, дозволить інтегрувати наслідки ГРП з літологічними та петрофізичними властивостями гірських порід продуктивних пластів.

Літологічні та петрофізичні фактори. Колектори з однаковою пористістю можуть демонструвати різну проникність, що обумовлюється їх літологічними особливостями. Підвищення проникності в масиві порід обумовлюється літогенною та тектонічною тріщинуватістю, а також розміром зерен, що складають теригенні товщі. Природна пористість і тріщинуватість порід впливає на збільшення насичення флюїдом зони розущільнення при гідророзриві, що дає більший ефект від його проведення. Незважаючи на еволюцію створення моделей, призначених для обчислення параметрів порово-тріщінного простору, більшість з них не покращують відомі моделі Картера [20] навіть для розрахунку розмірів тріщин в різних за складом осадових породах. Це є особливо суттєвим в контексті нашого дослідження - коли проникність відіграє домінуючу роль у зростанні об'єму тріщин в породному масиві.

Видобуток зі свердловини з проведеним гідравлічним розривом включає дві зони течії: потік від пласта до тріщини та потік уздовж тріщини в стовбур свердловини [20]. Під сучасну пору недостатньо інформації про механізм та основні фактори процесу нерівномірного розширення саме горизонтальних тріщин [22]. Тому наші дослідження суттєво доповнюють ці знання і можуть сприяти ефективним практичним рішенням.

Різна проникність порід не лише впливає на витік технологічної рідини, а й на форму та розміри тріщини [22]. Сучасні геологічні моделі наслідків ГРП можуть визначати умовно сферичну форму створеної після руйнування порід (коли немає змін напруги) та навіть правильно обчислити залежність витоку рідини з пропантом від проникності порід на одиницю площі будь-якої порово-тріщинної поверхні. Але більшість з них не в змозі описати фактичну геометричну форму зони розущільнення, яка створюється завдяки зміні проникності. Таке відхилення моделі від реальності стає значно важливішим на фоні збільшення максимальної проникності тріщини - тобто коефіцієнта витоку рідини з породи.

На зростання об'єму тріщин гідророзриву впливає безліч факторів, серед яких найважливішими є пружнопластичні властивості та міцність гірських порід, а також ступінь їх тектонічної напруженості. Окрім того, велике значення має розподіл тиску в породах у які нагнітається рідина [18]. Від цих параметрів залежать характер розкриття тріщин, а отже формування зони розущільнення в масиві гірських порід. Розкриття та форма тріщин обумовлюється також пружними і міцнісними властивостями різних літологічних типів порід та розподілом геодинамічних напруг у геологічному масиві.

На графіку (рис. 2) під час закриття тріщини зображено розподіл суміші відповідної концентрації пропанту по всій довжині тріщини. Розподіл пропанту лежить в інтервалі перфорації де немає проривів у підошву або покрівлю, що є прийнятним попереднім результатом для проведення ГРП. Чим більшою є концентрація пропанту в тріщині, тим більшою є її провідність. За графіком, приблизна середня провідність штучно

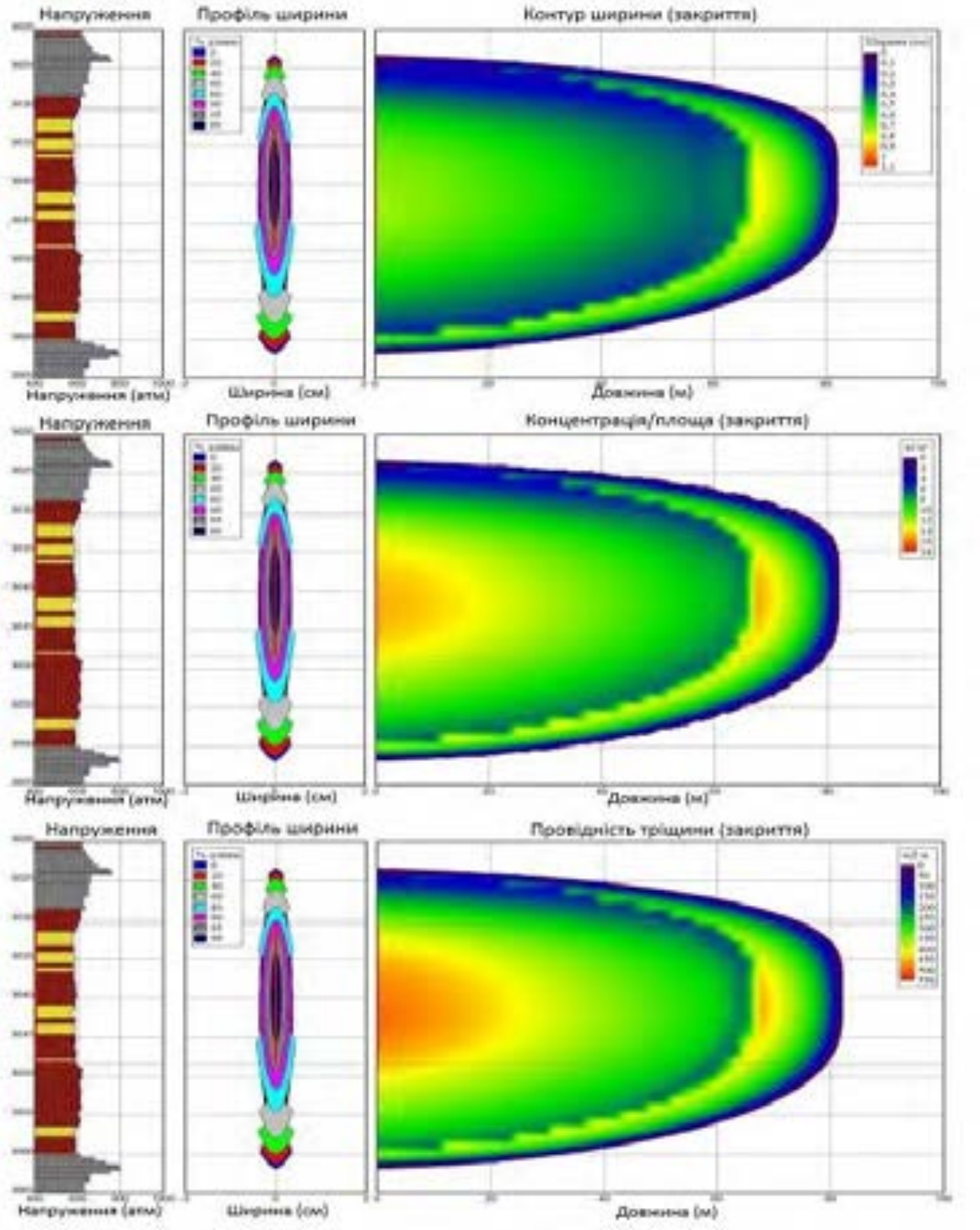


Рис. 2. Розвиток тріщини в пласті на прикладі гор. Г-8 (модель побудовано за допомогою модуля Mfrac) / Fig. 2. Crack development in a layer using the example of mountain G-8 (model constructed using the Mfrac module)

утвореної тріщини знаходиться в межах 70 мД/м. Це дозволяє визначити орієнтовні значення загальної довжини та висоти тріщини в різних за літологічним складом, породах. Наприклад, для горизонту Г–8 довжина та висота тріщин гідророзриву складає приблизно 80 м та 16 м відповідно.

Загальні петрофізичні та мінералогічні дані дозволяють зробити попередні висновки про крихкість колекторів кам'яновугільного віку Дніпровсько-Донецької западини і їхню поведінку при гідророзриві пласта. Усереднені дані стосовно крихкості порід-колекторів Західно-Хрестищенського ГКР (табл. 1).

Оптимальний діапазон пористості – 9–14%, у якому порода зберігає достатню механічну цілісність, але дозволяє формування стійких тріщин в процесі проведення гідророзриву пласта. За нашими даними, отриманими при проведенні ГРП в карбонатно-теригенних породах Західно-Хрестищенської брахіантикліналі, висока проникність (>5мД) не є обов'язковою умовою застосування гідророзриву, проте вона значно підвищує ефективність штучного створення об'ємної зони розущільнення після операції ГРП.

Згідно петрофізичних даних для пісковиків і карбонатно-кварцевих товщ, що мають високі коефіцієнти крихкості, доцільним є використання високонапірних водних або полімерних систем. Натомисть для більш пластичних глинистих товщ (алевролітів, аргілітів) ефективнішими, на нашу думку, можуть бути газові або пінні флюїди (CO_2, N_2), які знижують набухання глин. При проектуванні операцій ГРП доцільно враховувати комбінований індекс крихкості окремих літологічних різновидів, що враховує як мінералогічні, так і еластичні параметри порід, в яких планується проведення ГРП.

Найбільш крихкими палеозойськими породами у межах об`єкту досліджень є пісковики, що містять у середньому 55 % кварцу та мають

Таблиця 1

Розрахунок індексу крихкості порід-колекторів Західно-Хрестищенського ГКР (А.Ткачов, 2025) / Calculation of the brittleness index of reservoir rocks in the Western Khrestishchensky field (A. Tkachov, 2025)

Колектор	Кварц (%)	Польові шпати (%)	Карбонати (%)	Глина (%)	Інші (%)	Густина (г/см³)	Коефіцієнт Пуассона	Пористість (%)	Проникність (мД)	Індекс крихкості (0-100)	Інтерпретація
Пісковик	55	10	2	18	15	2,45	0,2575	9-14	0,5-5	70	Помірний
Алевроліт	45	5	5	40	5	2,35	0,2767	6-10	0,05-0,5	50	Помірний
Вапняк	5	1	80	5	9	2,7	0,2505	3-8	0,01-1	95,2	Крихкий
Аргіліт	15	5	5	70	5	2,25	0,2882	1-5	0,001-0,05	20	Пластичний

комбінований індекс крихкості понад 70. Високий вміст кварцу, невелика кількість глини (до 20%) та середня пористість 9–14% зумовлюють сприятливі умови для розкриття тріщин при ГРП (табл. 1).

Алевроліти характеризуються помірною крихкістю (індекс ~50), зниженою пористістю (6–10%) та проникністю до 0,5мД. Вони менш сприятливі для розвитку стійких тріщин, але можуть бути продуктивними у разі наявності природної тріщинуватості.

Карбонатні породи (вапняки, доломіти) мають високу пружність, проте їхня крихкість є вибірковою, оскільки залежить від рівня карбонатизації та наявності мікротріщин [5].

Аргіліти та сланці демонструють мінімальну крихкість через переважання глинистих мінералів (~70%), низьку пористість і практично нульову проникність. У таких породах ініціація тріщин ускладнена, що вимагає високих тисків закачування та ретельного контролю мікросейсміки.

Комплексна оцінка крихкості порід Західно-Хрестищенського родовища, проведена авторами на основі мінералогічних та еластичних індексів, свідчить про значну літологічну неоднорідність продуктивних горизонтів і різну реакцію колекторів на дію технологічних навантажень. Найкращими для проведення розриву пласта можуть бути кварцові пісковики, адже вони мають помірну пористість і проникність. Їхні петрофізичні характеристики відповідають умовам високої природної крихкості, що забезпечує формування стійкої системи тріщин і збереження флюїдопровідності після закачування пропанту за даних термобаричних умов.

Порівняльний аналіз процесів, які відбуваються в породах внаслідок ГРП, вказує на те, що мінеральний склад і структурно-текстурні особ-

ливості порід визначають не лише характер тріщиноутворення, а й ефективність проникнення технологічної рідини у пласт. У пісковиках і вапняках тріщини, здебільшого, формуються уздовж меж зерен (кристалічних площин), мають значну довжину та відкритість. Це сприяє формуванню стабільних високо проникних каналів підвищеної фільтрації. У алевролітах і аргілітах, навпаки, спостерігається переважний розвиток зон розущільнення, де руйнування носить нестабільний, дифузний характер, без утворення стійкої системи тріщин.

З огляду на літологічні особливості Дніпровсько-Донецької западини, де в розрізі переважають пісковики та алевроліти, форма й об'єм руйнувань відіграють ключову роль у формуванні ефективних зон фільтрації після ГРП. У більшості випадків головна тріщина орієнтована вздовж напрямку максимальних горизонтальних напружень. Отже, оптимальний ефект ГРП досягається у породах із високим вмістом крихких мінералів (кварцу, карбонатів). У таких колекторах тріщини не лише формуються легше, а й зберігають відкритість (завдяки високій пружності породи) і після завершення процесу гідророзриву.

Динамічні зміни в пласті, що спричинені його гідравлічним розривом. В процесі гідравлічного розриву пласта пропант використовується для стабілізації тріщин. Це забезпечує їх ефективну флюїдопровідність в процесі формування та видобутку покладу. На відміну від інших методів стимуляції, таких, як кислотна обробка, рідина для розриву пласта, яка використовується в цьому випадку, хімічно не взаємодіє з пластом, що дозволяє їй проникати глибше, особливо в умовах високих температур і тисків. Однак, після гідророзриву пласта пропант лише певний час сприяє збереженню зони штучного розущільнення в породах, а потім, внаслідок їх геостатичного стиснення він може, навпаки, перекривати рух флюїдів у тріщинно-поровому просторі. Такі явища, відомі як «цементація пропанту» відбуваються за високих температур та тисків і є характерними для глибоких горизонтів палеозою (рис. 3).

На вкорінення пропанту в породу впливає

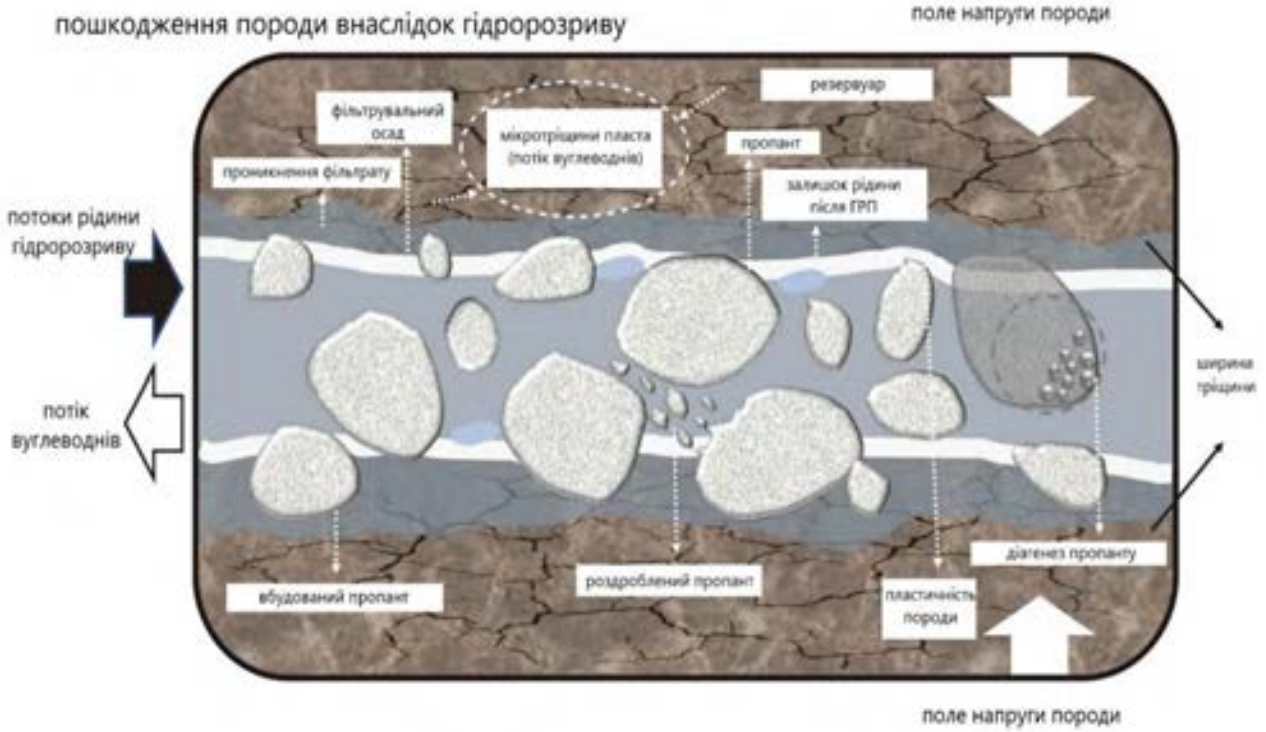


Рис. 3. Схема руйнування пласта в процесі фрекінгу (за A. Katende, 2021 р.) /
Fig. 3. Diagram of formation destruction during fracking (A. Katende, 2021)

багато факторів, серед яких його концентрація в рідині гідророзриву, розміри, спосіб розміщення, міцність породи на зсув, граничний тиск закриття тріщин, температура, тощо. Закриття тріщини, ущільненої складовими гідророзриву (пропант, пісок) може розглядатися у трьох аспектах: а) взаємодія з породою, б) руйнування пропанту та в) адсорбція залишків рідини гідророзриву стінками тріщин.

Зі зростанням геодинамічних напруг тріщині деформація гірських порід-колекторів може значно пришвидшити процес вкорінення пропанту. Взаємодія між рідиною гідророзриву та породою може викликати повзучість породи, що є критичним фактором у цьому процесі. Попередні теоретичні дослідження розділяли вклинювання

пропанту на дві окремі фази [14,24]:

1) пружна деформація, що призводить до вкорінення пропанту в геомасив порід;

2) деформація повзучості, що спричиняє вкорінення пропанту в породу, яке залежить від часу.

У масиві Західно-Хрестищенського родовища виявлено ознаки гідродинамічної інверсії, що проявляються у зміні напрямку потенціометричних градієнтів, нестандартних трендах пластових тисків та неузгоджених реакціях суміжних свердловин на експлуатаційні навантаження. Для встановлення механізмів інверсії потрібно застосувати комплексну методику, що поєднує порівняльний аналіз потенціометричних карт серії дат, часові ряди пластових тисків.

Для оцінки крихкості не існує єдиної універсальної формули. Найпоширеніші методи базуються на мінералогічному складі та механічних властивостях породи. Пластичні породи (наприклад, глинисті сланці, аргіліти) при навантаженні не розриваються, а деформуються, "поглинаючи" енергію, що робить ГРП менш ефективним [16]. Найпростіше визначення крихкості порід, яке використовується при плануванні ГРП, розраховується за формулою [16,24]:

$$B_{min} = \frac{Q_{tz} + Dol}{Q_{tz} + Carb + Clay}$$

де: B_{min} – індекс крихкості за мінералогією (в частках одиниці або відсотках).

Q_{tz} – вміст кварцу (%). Кварц – тверда та крихка мінеральна складова.

Dol – вміст доломіту (%).

Carb – вміст карбонатів (кальциту тощо) (%).

Clay – вміст глинистих мінералів (%).

За модулем Юнга та коефіцієнтом Пуассона існують різні варіації, але найчастіше використовують середнє арифметичне двох складових:

$$B_{\text{mec}} = \frac{BRIT_{\text{e}} + BRIT_{\upsilon}}{2}$$

де:

$$BRIT_{\text{e}} = \frac{E + E_{min}}{E_{max} + E_{min}}$$

$$BRIT_{\upsilon} = \frac{\upsilon_{max} + \upsilon}{\upsilon_{max} + \upsilon_{min}}$$

де: B_{mec} – механічний індекс крихкості (0-1 або 0-100%).

E – модуль Юнга для цільового інтервалу.

E_{min}, E_{max} – мінімальне та максимальне значення модуля Юнга в розрізі, що аналізується.

υ *(пи)* – коефіцієнт Пуассона для цільового інтервалу.

υ_{min}, υ_{max} – мінімальне та максимальне значення коефіцієнта Пуассона в розрізі.

Модуль Юнга (E) – характеризує жорсткість породи. Крихкі породи зазвичай мають високий модуль Юнга. Коефіцієнт Пуассона (ν) — характеризує здатність до поперечної деформації. Крихкі породи мають низький коефіцієнт Пуассона. Нормалізація на min/max значення по розрізу необхідна для приведення показників до єдиної шкали.

Для прогнозування орієнтації та геометрії тріщини розраховують напруження в пласті. Горизонтальний стрес (σ_h, σ_H): напруження, що діють у горизонтальній площині. Вертикальний стрес (σ_v): напруження від ваги вищезалягаючих порід [22,24].

$$\sigma_{\upsilon} = \rho g H$$

де: ρ – середня щільність вищезалягаючих порід (кг/м³);

g – прискорення вільного падіння (9,81 м/с²);

H – глибина (м).

Якщо застосувати розрахунки конкретно до Західно-Хрестищенського ГКР, то маємо:

$$\sigma_{\upsilon} = 2300 * 9{,}81 * 3500 = 78{,}970{,}500 \text{ Па} = 78{,}9 \text{ МПа}$$

Маємо вертикальний стрес ~ 78,9 МПа на глибині 3500м.

Таким чином, крихкість та межа пружності породи -це комплексний параметр, що інтегрує дані про літологічний склад та фізико-механічні властивості породи і є вирішальним для прийняття оптимальних рішень при проектуванні та проведенні ГРП.

Висновки. В процесі проведених досліджень авторами зроблено наступні висновки:

1. Результати проведених досліджень свідчать, що об'єми руйнувань в процесі ГРП в різних літологічних типах колекторів є ключовим етапом при розробці моделей гідророзриву пласта та прогнозуванні його ефективності. Оптимальними для створення довготривалих каналів фільтрації є щільні кварцові пісковики.

2. Визначено індекси крихкості порід-колекторів Західно–Хрестищенського газо-конденсатного родовища.

3. Гідравлічний розрив пласта обумовлює специфічні форми руйнування літогенних та тектоногенних колекторів. При цьому глибокі продуктивні горизонти які характеризується підвищеною температурою (до 80º), високим тиском та мінералізацією пластових вод (298-359 г/дм^3) , що пояснюється гідродинамічною інверсією у склепінній частині Західно-Хрестищенської антиклінальної структури

4. Колектори Західно-Хрестищенського ГКР характеризуються високою петрофізичною неоднорідністю, де крихкість визначається спів-

відношенням кварцу, карбонатів і глини. Найбільш перспективними для ефективного гідророзриву є горизонти пісковиків, які мають збалансовану пористість, високу крихкість та помірну проникність. При проектуванні операцій ГРП доцільно враховувати комбінований індекс крихкості, що об'єднує як мінералогічні, так і еластичні параметри. У цілому, найбільш перспективними об'єктами для проведення гідророзриву пласта на Західно-Хрестищенському родовищі є середньозернисті кварцові пісковики авіловської та араукаритової світ верхнього карбону, які поєднують високу крихкість, достатню пористість і сприятливі термобаричні умови.

Список використаних джерел

1. *Іванюта М. М. (1998). Атлас родовищ нафти і газу України: у 6 т. Центр Європи.*
2. *Бартащук О., & Суярко В. (2020). Геодинаміка формування перехідної зони між Дніпровсько-Донецькою западиною і Донецькою складчастою спорудою. 1. Тектонічний стиль інверсійних деформацій. Геодинаміка, 2(29), 51–65. https://doi.org/10.23939/jgd2020.02.051*
3. *Бартащук О., Суярко В., & Чуєнко О. (2023). Тектонічна інверсія Дніпровсько-Донецької западини. 3. Тектонічний стиль деформацій. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія "Геологія. Географія. Екологія", (57), 12–28. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-01*
4. *Білецький В. С., & Фик М. І. (2019). Геолого-технологічні, економічні та екологічні аспекти використання технології гідророзриву пласта для розробки родовищ сланцевого газу. Geotechnologies, (2), 28–35. https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/43116*
5. *Білецький В. С. (2004). Гірничий енциклопедичний словник: у 3 т. (Т. 3). Східний видавничий дім.*
6. *Західно-Хрестищенське родовище. (2021). В Енциклопедія Сучасної України. Інститут енциклопедичних досліджень НАН України. https://esu.com.ua/article-16410*
7. *Качмар Ю. Д., Світлицький В. М., Синюк Б. Б., & Яремійчук Р. С. (2004). Інтенсифікація припливу вуглеводнів у свердловину (Кн. І). Центр Європи, 352.*
8. *Краснікова О. О. (2024). Геофізичний супровід планування та проведення гідравлічного розриву пласта [PhD дисертація, Київський національний університет імені Тараса Шевченка]. https://ir.library.knu.ua/handle/15071834/1965*
9. *Крохмаль В. О., & Давиденко О. М. (2023). Проведення гідравлічного розриву пласта для підвищення нафтовіддачі. Збірник "Молодь", (1), 29–30. http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/165497*
10. *Лазєбна Ю. В. (2019). Пінний гідророзрив пласта як ефективний метод інтенсифікації припливу вуглеводнів із низькопроникних колекторів. В Академічна й університетська наука: результати та перспективи (с. 208–210). Національний університет «Полтавська політехніка ім. Ю. Кондратюка». https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/9201*
11. *Мороз Л. Б., Григораш Б. М., & Жекало А. В. (2023). Дослідження проблем та перспектив збільшення видобутку вуглеводнів із застосуванням гідравлічного розриву пласта. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ, 23(3), 68–78. http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/9463*
12. *Товстюк З. М., Головащук О. П., & Лазаренко І. В. (2015). Дніпровсько-Донецька западина: успадкованість розвитку структур, розломних зон і зон розущільнення. Ukrainian Journal of Remote Sensing, (5), 1–10. https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/48*
13. *Хомин В. Р., & Палійчук О. В. (2014). Зміни геологічного середовища при проведенні гідророзривів пластів та заходи з його захисту в Карпатському регіоні. Геолого-мінералогічний вісник Криворізького національного університету, (1-2), 107–114.*
14. *Andrews I. J. (2013). The Carboniferous Bowland Shale gas study: geology and resource estimation. British Geological Survey for Department of Energy and Climate Change.*
15. *Bartaschuk O. V. (2020). Tectonic inversion of the Dnieper-Donetsk depression. Part 1. Collision tectonics of the Western Donetsk Graben. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (52), 10–23. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-52-01*
16. *Chen B., & Yan Z. (2020). Research review of rock mechanics experiment and numerical simulation under THMC multi-field coupling. Journal of University of Science and Technology Beijing. https://dx.doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.07.29.005*
17. *Colback P. S. B., & Wiid B. L. (1965). Вплив вмісту вологи на міцність гірських порід на стиск. Матеріали 3-го Канадського симпозіуму з механіки гірських порід, 55–83*
18. *Dunning J. D., & Huff W. L. (1983). Вплив водних хімічних середовищ на розповсюдження та морфологію тріщин і гідророзривів. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 88(B8), 6491–6499. http://dx.doi.org/10.1029/JB088iB08p06491*
19. *Howard G. C., & Fast C. R. (1970). Hydraulic fracturing. SPE Monograph, 203.*
20. *Kazemi H., Fakcharoenphol P., & Miskimins J. (2013, August). Simulation of Gel Filter Cake Formation, Gel Cleanup, and Post-Frac Well Performance in Hydraulically Fractured Gas Wells. SPE Production & Operations, 235–245.*
21. *Montgomery C. T., & Smith M. B. (2010). Hydraulic fracturing: History of an enduring technology. Journal of Petroleum Technology, 62(12), 26–40. https://doi.org/10.2118/1210-0026-JPT*

22. Qiao Y., Zhang Y., Bai J., Shang L., Wei D., Hu X., Ren G., & Bai H. (2024, October). New understanding of non-uniform extension mechanism of horizontal fractures in shallow hypertonic reservoirs and research on main controlling factors [Paper presentation]. APOGCE 2024, Perth, Australia. https://doi.org/10.2118/221272-MS
23. Smith M. B., & Montgomery C. T. (2015). Hydraulic fracturing. CRC Press, 812.
24. Katende A., O'Connell L., Rich A., Rutqvist J., & Radonjic M. (2021). A comprehensive review of proppant embedment in shale reservoirs: Experimentation, modeling and future prospects. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 95, Article 104143. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.104143
25. U.S. Energy Information Administration. (2016, March 15). Hydraulic fracturing accounts for about half of current U.S. crude oil production. https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=25372

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу
Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Tectonophysical changes in rock mass during hydraulic fracturing (based on the example of the West-Khrestishche brachyanticline structure)

Anton Tkachov [1]
PhD student, Department of Fundamental and Applied Geology
[1] V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine;
Olga Serdiukova [1]
Senior Lecturer, Department of Fundamental and Applied Geology

ABSTRACT

Introduction. Hydraulic fracturing is a technology for creating an artificial compaction zone in a rock mass in order to form compact hydrocarbon accumulations. As a result, radical tectonophysical changes occur in the mass, associated with the emergence of systems of cracks and pores in productive terrigenous strata. The fracture-pore space formed by the action of a water-emulsion solution under high pressure on the rock mass creates a compact compaction zone in which hydrocarbons accumulate. If there are already existing lithogenic and tectogenic fractures and pores in productive formations, the rate of formation of the compaction zone may be accelerated or slowed down. The latter is due to a change in the vector of fluid flow into existing fractures, which reduces the impact-destructive effect of hydraulic fracturing. The properties of the hydraulic fracturing fluid significantly affect the fracture development mode. The viscosity of the process fluid depends on both its molecular weight and the concentration of the polymer it contains. A decrease in the viscosity of the latter indicates that the used fluid can be removed from the fracture by coiled tubing.

Objective. Identify tectonophysical changes occurring in rock formations as a result of hydraulic fracturing. To investigate the structural-tectonic and hydrodynamic factors influencing the hydraulic fracturing of sedimentary rocks in the coal complex.

Results. Tectonophysical changes occurring as a result of hydraulic fracturing are considered using the example of the West-Khrestishche brachyanticline structure – a fold of sublatitudinal extension in the Upper Carboniferous – Lower Permian deposits. It is located in the development zone in a thick sedimentary sequence of salt dome structures in the southeastern part of the Dnieper-Donets Basin. The geological factors influencing changes in the geological environment during hydraulic fracturing are studied using the example of the West-Khrestishche gas condensate field. A comprehensive analysis of the geological structure, hydrodynamic conditions, and seismic data was conducted. A model of the formation of pore-fracture space as a result of hydraulic fracturing was constructed.

Scientific novelty. Using the example of the West-Khrestyshche field, a comprehensive analysis of the impact of various factors on changes in the geological environment in the eastern part of the Dnieper-Donets Basin during hydraulic fracturing was conducted for the first time, and a schematic model of tectonophysical changes in the geological environment as a result of hydraulic fracturing was constructed.

Conclusion. The collectors of the West-Khrestyshche deposit are characterized by high petrophysical heterogeneity, where brittleness is determined by the ratio of quartz, carbonates, and clay. The most promising for effective hydraulic fracturing are sandstone horizons with balanced porosity, high brittleness, and moderate permeability. When designing hydraulic fracturing operations, it is advisable to consider the combined brittleness index, which combines both mineralogical and elastic parameters. In general, the most promising targets for hydraulic fracturing at the West-Khrestishche field are medium-grained quartz sandstones that combine high brittleness, sufficient porosity, and favorable thermobaric conditions.

Keywords*: Dnipro-Donets Basin, West-Khrestishche field, dense reservoirs, hydraulic fracturing, tectonophysical changes, productive formations, compaction zone, pore-fracture space, hydrocarbon accumulation, reservoir fragility.*

References

1. Ivanyuta M. M. (1998). Atlas of oil and gas fields of Ukraine: in 6 vols. Tsentr Yevropy. [in Ukrainian]

2. *Bartashchuk O., & Suyarko V. (2020). Geodynamics of the transitional zone formation between the Dnieper-Donets Depression and the Donets Folded Structure. 1. Tectonic style of inversion deformations. Geodynamics, 2(29), 51–65. https://doi.org/10.23939/jgd2020.02.051 [in Ukrainian]*
3. *Bartashchuk O., Suyarko V., & Chuyenko O. (2023). Tectonic inversion of the Dnieper-Donets Depression. 3. Tectonic style of deformations. Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (57), 12–28. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-01 [in Ukrainian]*
4. *Biletskyi V. S., & Fyk M. I. (2019). Geological, technological, economic and environmental aspects of using hydraulic fracturing technology for the development of shale gas fields. Geotechnologies, (2), 28–35. https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/43116 [in Ukrainian]*
5. *Biletskyi V. S. (2004). Mining encyclopedic dictionary: in 3 vols. (Vol. 3). Skhidnyi Vydavnychyi Dim. [in Ukrainian]*
6. *Zakhidno-Khrestyshchenske field. (2021). In Encyclopedia of Modern Ukraine. Institute of Encyclopedic Research of the National Academy of Sciences of Ukraine. https://esu.com.ua/article-16410 [in Ukrainian]*
7. *Kachmar Yu. D., Svitlytskyi V. M., Synyuk B. B., & Yaremiichuk R. S. (2004). Intensification of hydrocarbon inflow into the well (Bk. I). Tsentr Yevropy, 352. [in Ukrainian]*
8. *Krasnikova O. O. (2024). Geophysical support for planning and conducting hydraulic fracturing [PhD dissertation, Taras Shevchenko National University of Kyiv]. https://ir.library.knu.ua/handle/15071834/1965 [in Ukrainian]*
9. *Krokhmal V. O., & Davydenko O. M. (2023). Conducting hydraulic fracturing to enhance oil recovery. Collection "Youth", (1), 29–30. http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/165497 [in Ukrainian]*
10. *Laziebna Yu. V. (2019). Foam hydraulic fracturing as an effective method for intensifying hydrocarbon inflow from low-permeability reservoirs. In Academic and university science: results and prospects (pp. 208–210). National University "Poltava Polytechnic named after Yuri Kondratyuk". https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/9201 [in Ukrainian]*
11. *Moroz L. B., Hyhorash B. M., & Zhekalo A. V. (2023). Research of problems and prospects for increasing hydrocarbon production using hydraulic fracturing. Exploration and Development of Oil and Gas Fields, 23(3), 68–78. http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/9463 [in Ukrainian]*
12. *Tovstyuk Z. M., Holovashchuk O. P., & Lazarenko I. V. (2015). Dnieper-Donets Basin: inheritance of structure development, fault zones and decompaction zones. Ukrainian Journal of Remote Sensing, (5), 1–10. https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/48 [in Ukrainian]*
13. *Khomin V. R., & Paliichuk O. V. (2014). Changes in the geological environment during hydraulic fracturing and measures for its protection in the Carpathian region. Geological and Mineralogical Bulletin of Kryvyi Rih National University, (1-2), 107–114. [in Ukrainian]*
14. *Andrews I. J. (2013). The Carboniferous Bowland Shale gas study: geology and resource estimation. British Geological Survey for Department of Energy and Climate Change.*
15. *Bartaschuk O. V. (2020). Tectonic inversion of the Dnieper-Donetsk depression. Part 1. Collision tectonics of the Western Donetsk Graben. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (52), 10–23. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-52-01 [in Ukrainian]*
16. *Chen B., & Yan Z. (2020). Research review of rock mechanics experiment and numerical simulation under THMC multi-field coupling. Journal of University of Science and Technology Beijing. https://dx.doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.07.29.005*
17. *Colback P., Wild B. (1965) The influence of moisture content on thecompressive strength of rocks. Proceeding of the 3rd CanadianSymposium on Rock Mechanics, 55–83*
18. *Dunning J. D., & Huff W. L. (Aug 1983). Effects of aqueous chemical environments on crack and hydraulic fracture propagation and morphologies. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 88(B8), 6491–6499. http://dx.doi.org/10.1029/JB088iB08p06491*
19. *Howard G. C., & Fast C. R. (1970). Hydraulic fracturing. SPE Monograph, 203.*
20. *Kazemi H., Fakcharoenphol P., & Miskimins J. (2013, August). Simulation of Gel Filter Cake Formation, Gel Cleanup, and Post-Frac Well Performance in Hydraulically Fractured Gas Wells. SPE Production & Operations, 235–245.*
21. *Montgomery C. T., & Smith M. B. (2010). Hydraulic fracturing: History of an enduring technology. Journal of Petroleum Technology, 62(12), 26–40. https://doi.org/10.2118/1210-0026-JPT*
22. *Qiao Y., Zhang Y., Bai J., Shang L., Wei D., Hu X., Ren G., & Bai H. (2024, October). New understanding of non-uniform extension mechanism of horizontal fractures in shallow hypertonic reservoirs and research on main controlling factors [Paper presentation]. APOGCE 2024, Perth, Australia. https://doi.org/10.2118/221272-MS*
23. *Smith M. B., & Montgomery C. T. (2015). Hydraulic fracturing. CRC Press, 812.*
24. *Katende A., O'Connell L., Rich A., Rutqvist J., & Radonjic M. (2021). A comprehensive review of proppant embedment in shale reservoirs: Experimentation, modeling and future prospects. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 95, Article 104143. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.104143*
25. *U.S. Energy Information Administration. (2016, March 15). Hydraulic fracturing accounts for about half of current U.S. crude oil production. https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=25372*

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 20 September 2025
Accepted 25 October 2025

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-09
UDC 553.97(477.8):543.423.1
Received 11 October 2025
Accepted 18 November 2025

Vertical Distribution of Mobile Trace Elements in Peat Deposits of the Lviv Region and Their Relationships with Physico-Chemical Properties

Myroslava Yakovenko [1]
PhD (Geology), Senior Researcher, Senior Research Scientist,
[1] Institute of Geology and Geochemistry of Combustible Minerals of NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine,
e-mail: myroslavakoshil@ukr.net, https://orcid.org/0000-0001-8967-0489;
Yurii Khokha [1]
DSc (Geology), Senior researcher, Leading Researcher,
e-mail: khoha_yury@ukr.net, https://orcid.org/0000-0002-8997-9766;
Myroslav Pavlyuk [1]
Academician of NASU, DSc (Geology & Mineralogy), Professor, Chief Researcher,
e-mail: pavlyuk.myroslav@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8741-0624

ABSTRACT

Problem statement: Peatlands act as natural geochemical barriers that accumulate various chemical elements, including heavy metals. The qualitative characteristics of peat and its potential applications directly depend on the spectrum and concentrations of elements present in it. For the peatlands of Ukraine, no systematic studies of mobile element forms or assessments of their relationships with local geochemical and physico-chemical gradients (pH, ash content, moisture) have yet been conducted. This gap highlights the need for systematic, methodologically unified investigations with broad spatial coverage and standardized procedures for data processing.

Objective: To determine the levels, spatial (profile) distribution, and factors controlling the mobility of mobile forms of selected elements (Pb, As, Tl, Mo, Zn, Cd, Ni, Sb, Cu, Co, Mn, Cr, V) in the peats of the Lviv region; to clarify their relationships with physico-chemical properties of peat (pH, ash content, moisture content, organic matter content); and to identify depth-related trends and accumulation anomalies.

Methods: Twenty-six samples were collected from the 0–140 cm depth interval at 20 cm steps (across three profiles), supplemented with samples from upper peat layers at additional sites. Mobile element forms were extracted with 0,2 M HCl and quantified by inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-AES). Ash content, moisture content, and pH were determined using arbitration methods according to DSTU standards. Statistical analyses were applied to evaluate the dependence of element concentrations on depth and physico-chemical parameters, to examine relationships among trace elements and other peat characteristics, and to assess potential sources of their accumulation.

Results: Average concentrations of mobile forms of Pb, Zn, Cd, Cu, Ni, Mn, and Cr were 10,8; 15,5; 0,65; 3,86; 2,09; 16,6 and 0,96 ppm, respectively. Very high coefficients of variation (>80%) were observed for Pb, Cd, Tl, Mo, Sb, and Mn, indicating a mosaic spatial distribution. Maximum values of Pb (132,35 ppm) and Cd (8,88 ppm) occurred in the 60-80 cm horizon of the Honchary peatland, while elevated As (14,9 ppm) was found in the lower part of the Hamaliivka profile. In most samples, concentrations of mobile element forms were significantly lower than the approximate normal values for soils and the contamination thresholds established for arable soils in EU countries, indicating a generally low level of technogenic impact, despite the presence of local Pb and Cd anomalies. A positive relationship between the contents of most metals and ash content, and a negative relationship with organic matter content were identified. Significant correlations among Zn, Cu, Ni, Co, Mn, and V reflect shared sources and accumulation mechanisms. The strongest correlation ($r \approx 0,99$) was observed between mobile Pb and Cd, confirming their similar geochemical behavior in peat.

Conclusions: The results expand current knowledge on the geochemistry of European peatlands and, for the first time, characterize the mobile forms of several elements in the peats of the Lviv region. The peatlands of the region act as effective geochemical barriers for potentially toxic elements, while local deep anomalies of Pb–Cd and As may reflect both geogenic influences and historical atmospheric inputs. These findings refine the understanding of the geochemistry of Ukrainian peatlands and provide a basis for future assessments of environmental risks and the suitability of peat for economic use.

Keywords*: peat, peatland, geochemistry, trace elements, mobile forms, accumulation, Ukraine, Lviv region, ICP-AES.*

In cites: Yakovenko Myroslava, Khokha Yurii, Pavlyuk Myroslav (2025). Vertical Distribution of Mobile Trace Elements in Peat Deposits of the Lviv Region and Their Re-lationships with Physico-Chemical Properties. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 113-127. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-09

Introduction

Peatlands, owing to the high sorption capacity of organic matter and a unique combination of environmental conditions (waterlogging, predominantly acidic pH, and a substantial content of humic components), act as important natural geochemical barriers despite occupying only about 3% of the Earth's land surface. These geological systems accumulate various chemical elements, particularly heavy metals that are potentially toxic [1]. Potentially toxic elements (*PTEs*) include both essential (biogenic) trace elements such as Fe, Mn, Cu, Zn, Ni, and Mo, which are required for the functioning of plants and microorganisms, and strictly toxic metals and metal-

© Yakovenko Myroslava, Khokha Yurii, Pavlyuk Myroslav, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

loids (Cd, Pb, Cr, As, Sb, Tl, V) for which no biologically beneficial roles are known [2]. Conceptually, nearly every element in the periodic table may exhibit toxicity under certain conditions, depending on concentration, biological environment, pH, and redox potential.

In peat deposits, the accumulation of *PTE*s is determined by a combination of external inputs (atmospheric deposition, inflow from surface and groundwater, local anthropogenic sources) and intrinsic properties of the peat itself (organic matter content and composition, degree of decomposition and mineralization, pH, redox conditions, and the content and proportions of oxides).

A large share of these elements in peat is incorporated into stable organo-mineral complexes with humic substances, which reduces their mobility and bioavailability. However, changes in physico-chemical conditions such as acidity, ash content, moisture level, and redox regime, can remobilize bound forms and induce their transfer into groundwater and surface waters. Therefore, assessing the mobile forms of chemical elements is of particular importance, as they determine bioavailability, ecological mobility, and potential toxicity, in contrast to total concentrations.

The qualitative characteristics of peat and its potential applications directly depend on the concentrations of elements it contains. Given the central role of fundamental geochemical research in the preliminary assessment of peat resources and their rational use, this study aims to expand possibilities for practical application and support the industrial development of peatlands in the Lviv region.

The aim of the study is to evaluate the levels, spatial (profile) distribution, and factors controlling the mobility of mobile forms of heavy metals and potentially toxic trace elements (Pb, As, Tl, Mo, Zn, Cd, Ni, Sb, Cu, Co, Mn, Cr, V) in the peats of the Lviv region; to clarify their relationships with physico-chemical properties of peat (pH, ash content, moisture content, organic matter content); and to identify depth-related trends and accumulation anomalies.

The object of the study is peat material from lowland-type deposits within the Lviv region (Bilogorshcha, Honchary, Hamaliivka, Artyshchiv, Polonychna, Sknylivka).

The subject of the study is the content of mobile forms of Pb, As, Tl, Mo, Zn, Cd, Ni, Sb, Cu, Co, Mn, Cr, and V in peat, as well as the physico-chemical characteristics of the samples (pH, ash content, moisture content, organic matter content).

A considerable body of research by authors from Northern and Eastern Europe has examined the geochemistry of heavy metals and other potentially toxic elements in peatlands and soil systems, the patterns of metal enrichment in peat bogs, mechanisms of metal fixation and mobility, and the influence of environmental changes on the migration behavior of *PTE*s. Particular attention has been devoted to peatlands in Scandinavia and the Baltic region [1, 3–8]. These studies emphasize not only total metal concentrations but also mobile fractions, which determine bioavailability and potential ecological risks [9].

In contrast to European research, Ukrainian studies devoted to the geological and geochemical characterization of peat and peatlands remain limited, despite Ukraine's considerable peat resources. Fragmentation is especially evident in studies of mobile element forms and their relationships with local geochemical and physico-chemical gradients (pH, ash content, moisture). This highlights the need for systematic, methodologically unified investigations with broader spatial coverage and standardized approaches to data comparison.

Methods

Peat samples were collected using a core sampler from depths of 0 to 140 cm in 20 cm increments; the maximum depth reached 140 cm at the Honchary and Hamaliivka sites. Samples were placed in sealed polyethylene zip-lock bags with appropriate labeling and tightly closed to minimize weathering and contamination. A total of 26 samples were obtained.

In the laboratory, the samples were air-dried at room temperature, avoiding direct sunlight, then crushed, homogenized in an agate mortar, sieved through a 2,5 mm mesh, quartered, and divided into analytical portions and duplicates.

The physico-chemical properties of the samples were analyzed in accordance with DSTU standards: moisture content [10], ash content [11], and pH [12] were determined. To ensure statistical reliability, each analytical parameter for every depth interval was measured in triplicate, with final values expressed as arithmetic means.

To determine the mobile forms of chemical elements, all samples were subjected to extraction with 0,2 M HCl following DSTU 4405:2005 [13].

The concentrations of mobile forms of Pb, As, Tl, Mo, Zn, Cd, Ni, Sb, Cu, Co, Mn, Cr, and V were measured by inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-AES) using a Thermo Fisher Scientific iCAP PRO Series instrument operated with Qtegra Intelligent Scientific Data Solution software. Detection limits and operational ranges complied with analytical requirements for natural soil and peat matrices. All analyses were conducted in the analytical laboratory of Alpinus Chemia Sp. z o.o., Solec Kujawski, Poland.

The concentrations of trace elements in the studied peat deposits were compared with their nat-

ural levels in the Earth's crust and soils. Concentration coefficients were calculated, and the results were evaluated in comparison with analogous studies conducted for peat deposits in Europe. Mathematical and statistical data processing included the calculation of mean, median, minimum and maximum values, variance, standard deviation, coefficient of variation, skewness, and kurtosis for the physico-chemical parameters and the mobile forms of the studied elements. Correlation analysis was applied to identify dependencies and typomorphic associations among the elements.

Results and Discussion

The investigated peatlands are located within the Lviv region and correspond to the territories of the following settlements (Fig. 1): Honchary (Pustomyty district), Hamaliivka (Zhovkva district), Artyshchiv (Horodok district), Polonychna (Radekhiv district), Bilogorshcha (Lviv district), and Sknylivok (Lviv district). The last two sites are situ-

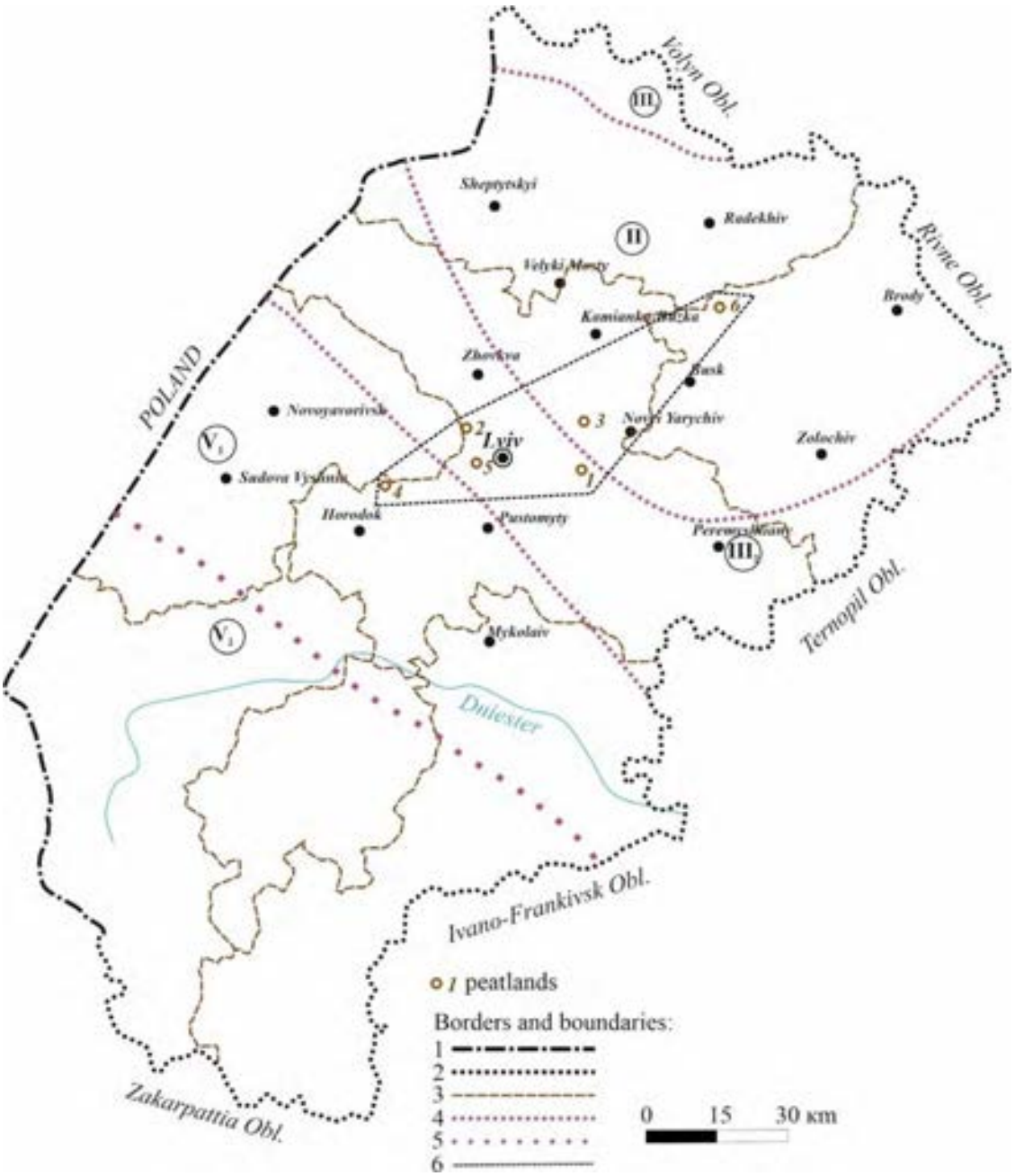


Fig. 1. Map-scheme of the location of research objects
(based on a schematic map of the zoning of the Lviv region (Scale 1:1 500 000)

Symbols for fig. 1:

Borders and boundaries: 1 – the state border of Ukraine; 2 – border of the Lviv region; 3 – districts of the Lviv region; 4 and 5 – peat regions and districts (based on materials [14]): II – Malopilska peat region. III – Forest-steppe peat region: III1 – Volyn foreststeppe region, III2 – Podilsk forest-steppe region. V – Carpathian peat region: V1 - Pre-Carpathian region, V2 – Carpathian; 6 – research area;
Peatlands: 1 – Honchary, 2 – Bilorhoshcha, 3 – Hamaliivka, 4 – Artyshchiv, 5 – Sknyilivok, 6 – Polonychna

ated directly within or adjacent to the city of Lviv.

According to the physical-geographical zoning of peat bogs in Ukraine [14], the peatlands of the study area belong to the Male Polissya peat-bog region with Roztochchya. Most sites – Bilogorshcha, Honchary, Hamaliivka, Sknylivok, and Artyshchiv – are located within the Podilskyi district of the Forest-Steppe peat region, while Polonychna belongs to the Male Polissya peat region.

The study area is situated in a temperate continental climate zone with sufficient moisture supply, which favors waterlogging in low-lying landforms. The local hydrological network consists of valleys of the tributaries of the Western Bug (including the Poltva) and the Dniester (including the Vereshchytsia).

The oldest geological units that directly influence the surface morphology, hydrogeology, and the formation of the soil profile are the Upper Cretaceous silicate-carbonate sequences of the Roztochchya area (gray sandy marls, limestones, and marly sandstones, locally fractured), as well as the underlying or adjacent Miocene (Badenian-Sarmatian) sediments of the Pre-Carpathian Foredeep. These comprise sands, sandstones, limestones, marls, and clays (locally containing gypsum or anhydrite), which form alternating permeable and impermeable layers. This alternation controls the regimes of groundwater and confined aquifers and locally promotes overmoistening, stagnation of runoff, and the development of wetlands in floodplains and depressions: conditions typical for the Male Polissya region and the foothills of Roztochchya.

Everywhere, the near-surface section is covered by Quaternary deposits: alluvial-lacustrine sands and loams dominate in valley floors and depressions, deluvial loams occur on slopes, and locally, on elevated surfaces, loess-like loams are preserved.

The studied peat deposits are of Holocene age and belong to the lowland (eutrophic, minerotrophic) type, formed under conditions of mineral-rich groundwater feeding and dominated by herbaceous vegetation, sedges, hypnum mosses, and woody remains. They overlie alluvial-lacustrine sediments, and their thickness ranges from decimeters to several meters depending on basin morphology and the degree of drainage.

Physico-chemical characteristics of peat.

The analyzed peat samples exhibit a wide range of *moisture content (W)*, varying from 14,98 to 87,41%, with a mean value of 59,06% and a median of 63.89% (Tables 1, 2). The substantial variability (coefficient of variation ≈ 36%), together with negative skewness and a moderately flattened distribution (kurtosis < 0), indicates the predominance of relatively well-moistened layers and the presence of locally desiccated horizons in the upper parts of some profiles. The highest moisture values were recorded in the Artyshchiv peatland ($W \geq 80\%$) and in the lower horizons of Bilogorshcha and Hamaliivka ($W \geq 76\%$).

The high dispersion and marked variability of moisture values with depth reflect the complex interplay of changes in mineral composition, micro- and mesopore structure, degree of peat decomposition and compaction, as well as the dynamics of the hydrological regime and groundwater level. A general increase in peat moisture with depth (Fig. 2a) is observed at all sites, primarily due to proximity to the stable groundwater table, reduced influence of evaporation, and changes in the physical properties of peat.

The ash content of peat (proportion of residue after oxidation, expressed as a percentage of dry matter) reflects the amount of inorganic and mineral components present. Ash content is one of the key characteristics of peat, since the total quantity of chemical elements, including those available to plants, depends on the share of the mineral fraction. The ash content of the studied peats from the Lviv region exhibits a relatively uniform distribution (coefficient of variation: 41,28; variance: 71,41; standard deviation: 8,45) and ranges from 9,69% to 37,08%, with an average of 20,47% (median = 16,05%). These lowland peats formed under conditions of mineral-rich groundwater inflow, which explains their relatively high ash values, genetically linked to secondary inputs of inorganic sedimentary material into the peat mass. Elevated ash content is also associated with river flooding and the wash-in of mineral particles from steep valley slopes.

High ash values are characteristic primarily of the deeper horizons of Profile 1 (Honchary, 80-140 cm) and several samples from the Artyshchiv and Polonychna peatlands (Table 1), indicating a greater proportion of mineral impurities and potentially stronger groundwater influence. A downward-to-upward decrease in ash content is observed in the Honchary profile, while an opposite trend – an increase toward the surface is found in the Bilogorshcha and Hamaliivka profiles (Fig. 2b). These patterns are likely controlled by local geological and hydrological conditions, including the presence of mineral interlayers and fluctuations in the hydrological regime during different stages of peat formation.

The acid-base properties (pH) of peat are largely determined by the type and composition of organic acids present (primarily humic and fulvic acids) and by their associated compounds. pH is one of the most influential factors controlling the mobility and chemical speciation of metals. Microcomponents dissolved in peatland waters form various organometallic complexes with organic matter, and the transition of these complexes into solution depends

Table 1

Content of mobile forms of chemical elements (ppm) and general physico-chemical characteristics of peatlands of the Lviv region

Peatland	Depth, h, cm	Trace element, ppm													Physyco-chemical parameter			
		Pb	Tl	Zn	Cd	Cu	As	Sb	Mo	Ni	Co	Mn	Cr	V	Moisture content, W, %	Ash, A, %	pH	Organic matter, %
Honchary, Profile 1																		
	0-20	7,200	0,005	26,083	0,250	4,367	2,850	0,005	0,067	2,075	0,500	7,833	0,367	0,350	21,38	15,95	6,78	84,05
	20-40	8,850	0,005	13,500	0,383	4,433	3,050	0,028	0,052	1,750	0,125	7,383	1,733	0,225	24,77	16,11	6,68	83,89
	40-60	3,025	0,005	16,267	0,200	6,567	1,900	0,005	0,052	2,475	0,125	5,167	1,050	0,250	43,48	23,81	7,34	76,19
	60-80	132,350	0,005	18,617	8,883	4,067	2,650	0,053	0,035	2,175	0,150	3,383	0,483	0,200	43,80	26,88	7,41	73,12
	80-100	2,650	0,253	12,967	0,167	2,683	3,200	0,005	1,833	1,225	0,050	8,817	0,450	0,150	20,21	36,55	7,39	63,45
	100-120	1,200	0,005	10,650	0,052	4,300	1,600	0,005	0,020	1,775	0,028	6,950	0,087	0,125	31,84	34,95	5,94	65,05
	120-140	27,725	0,028	13,900	1,767	2,883	1,500	0,005	0,050	1,225	0,050	6,783	0,600	0,175	46,66	32,51	7,50	67,49
Bilorhoshcha, Profile 2																		
	0-20	13,050	0,005	41,417	0,667	6,817	1,800	0,005	0,267	3,200	0,450	70,250	2,283	0,500	61,27	21,55	4,48	78,45
	20-40	10,350	0,005	29,900	0,867	6,750	3,050	0,005	0,567	3,400	0,425	59,183	1,400	1,275	63,03	37,08	4,61	62,92
	40-60	3,175	0,005	13,350	0,183	3,567	2,250	0,028	0,717	1,700	0,075	24,067	1,067	0,150	73,20	13,99	4,86	86,01
	60-80	6,025	0,005	16,683	0,183	2,667	2,550	0,103	0,068	2,550	0,075	13,600	1,017	0,150	76,37	13,20	5,12	86,8
	80-100	6,950	0,005	19,100	0,433	4,183	1,750	0,078	0,600	1,650	0,175	16,733	0,667	0,225	77,50	13,42	5,29	86,58
	100-120	6,350	0,028	16,433	0,350	4,000	3,250	0,005	0,433	1,575	0,075	26,617	0,733	0,175	77,10	14,75	5,39	85,25
Hamaliivka, Profile 3																		
	0-20	4,400	0,005	13,450	0,267	2,450	3,500	0,028	0,005	2,600	0,125	17,100	0,667	0,725	51,99	30,70	5,65	69,3
	20-40	3,200	0,053	9,533	0,183	2,350	3,000	0,005	0,005	2,025	0,150	16,883	1,317	0,500	61,97	25,08	5,62	74,92
	40-60	2,125	0,005	9,200	0,133	3,133	2,150	0,005	0,052	1,750	0,075	8,033	0,467	0,175	73,65	11,93	4,57	88,07
	60-80	2,925	0,005	18,283	0,150	2,417	1,850	0,005	0,037	1,775	0,028	6,850	0,317	0,125	75,80	9,69	4,40	90,31
	80-100	1,000	0,005	9,483	0,067	2,700	1,900	0,005	0,005	1,275	0,005	7,200	0,350	0,100	76,36	12,40	5,18	87,6
	100-120	1,475	0,103	7,550	0,133	2,950	1,750	0,028	0,052	1,350	0,028	10,083	0,417	0,100	76,73	14,16	5,59	85,84
	120-140	1,250	0,005	6,950	0,083	2,867	14,900	0,005	0,133	1,150	0,005	11,867	3,433	0,125	78,04	14,72	6,08	85,28
Artyshchiv																		
	0-20	16,150	0,005	20,383	0,650	7,183	2,50	0,005	1,983	2,900	0,475	20,033	1,283	0,450	80,77	27,41	5,46	72,59
	40-60	9,225	0,528	16,233	0,317	5,250	4,55	0,078	0,550	2,175	0,225	6,933	0,933	0,150	87,41	15,99	5,00	84,01
Sknyilivok																		
	0-30	2,400	0,028	9,700	0,167	3,333	2,60	0,005	0,005	3,325	0,275	10,367	0,950	0,600	69,58	14,10	4,63	85,90
Polonychna																		
	0-40	3,950	0,028	9,167	0,183	3,267	5,000	0,028	0,050	1,750	0,125	35,083	1,967	0,450	63,89	23,42	7,69	76,58
	0-40	2,400	0,005	13,217	0,167	2,633	2,850	0,103	0,052	1,925	0,075	7,300	0,650	0,625	63,88	18,60	5,62	81,40
	0-40	1,000	0,005	11,233	0,100	2,617	2,550	0,178	0,005	3,575	0,275	15,833	0,235	1,425	14,98	13,26	5,39	86,74

Table 2

Statistical parameters of the distribution of migration forms of chemical components and physico-chemical indicators in peats of Lviv region

Chemical elements and physico-chemical indicators	Mean	Median	Min	Max	Variance	Std.Dev.	Coef.Var.	Skewness	Kurtosis
W, %	59,06	63,89	14,98	87,41	462,38	21,50	36,41	-0,82	-0,59
A, %	20,47	16,05	9,69	37,08	71,41	8,45	41,28	0,75	-0,77
pH	5,76	5,53	4,40	7,69	1,08	1,04	18,04	0,63	-0,83
OP, %	79,53	83,95	62,92	90,31	71,41	8,45	10,63	-0,75	-0,77
Pb (ppm)	10,78	3,58	1,00	132,35	649,71	25,49	236,35	4,69	22,94
As	3,10	2,58	1,50	14,90	6,52	2,55	82,45	4,25	19,91
Tl	0,04	0,01	0,01	0,53	0,01	0,11	254,76	3,83	15,48
Mo	0,30	0,05	0,01	1,98	0,27	0,52	176,55	2,51	6,05
Zn	15,51	13,48	6,95	41,42	57,56	7,59	48,92	1,91	4,65
Cd	0,65	0,18	0,05	8,88	2,94	1,72	262,63	4,78	23,56
Ni	2,09	1,85	1,15	3,58	0,51	0,71	34,16	0,72	-0,45
Sb	0,03	0,01	0,01	0,18	0,00	0,04	139,99	2,06	4,36
Cu	3,86	3,30	2,35	7,18	2,24	1,50	38,71	1,14	0,18
Co	0,16	0,13	0,01	0,50	0,02	0,15	93,89	1,22	0,38
Mn	16,55	10,23	3,38	70,25	258,75	16,09	97,19	2,37	5,62
Cr	0,96	0,70	0,09	3,43	0,55	0,74	77,60	1,76	3,86
V	0,37	0,21	0,10	1,43	0,12	0,34	93,88	2,01	3,97

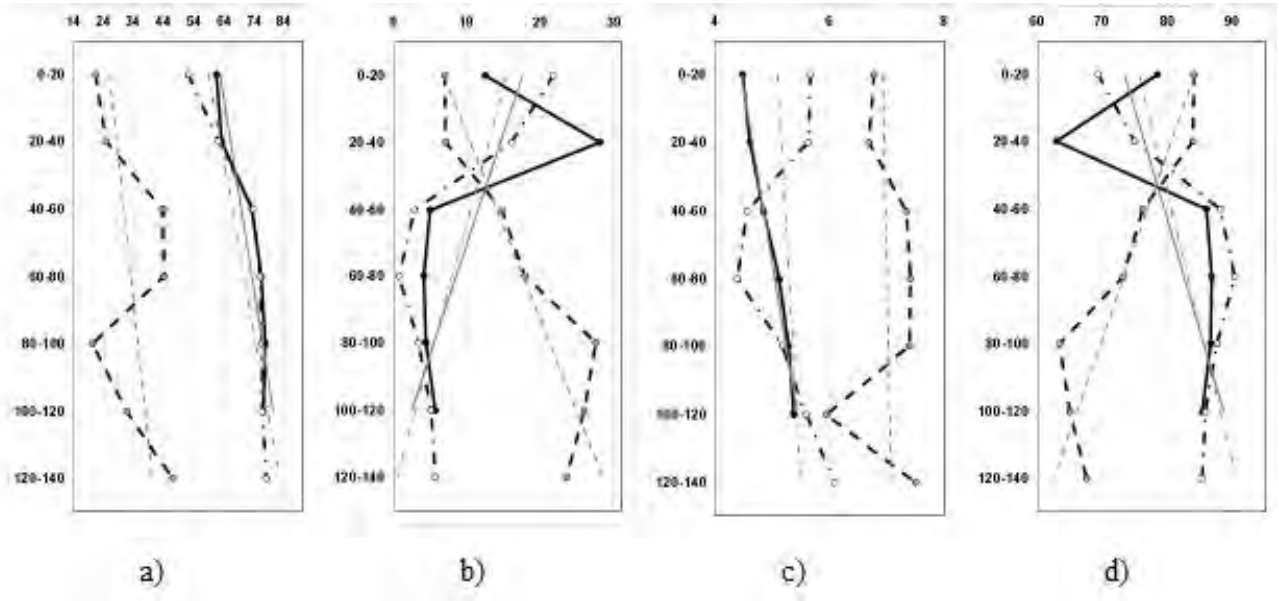
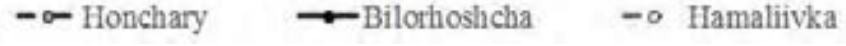


Fig. 2. Changes in the values of moisture (a), ash content (b), pH (c), and organic matter (OM) content (d) of the studied peats in Lviv Region with depth for Profiles 1 (Honchary), 2 (Bilohorshcha) and 3 (Hamaliivka).

Symbols for fig. 2:



(trend lines – grey color)

X-axis: values of moisture content, W (a); ash content, A (b); pH (c); organic matter, OM (d);
Y-axis: depth of the peat deposit profile, cm.

strongly on the pH of the environment. Thus, pH levels and their variations are crucial in regulating the geochemical migration and precipitation of chemical elements in peatlands.

Changes in pH directly influence the stability of metal-organic complexes. Their stability depends

both on the intrinsic properties of the metal and on the functional groups participating in coordination. In general, transition metals form complexes with humic substances following the well-known Irving–Williams series [15, 16] for divalent ions: Pb^{2+} > Cu^{2+} > Ni^{2+} > Co^{2+} > Zn^{2+} > Cd^{2+} > Fe^{2+} > Mn^{2+}.

It should be noted that the Irving–Williams series formally applies to divalent metal ions in idealized aqueous systems. In peat environments iron commonly occurs as Fe^{3+} or is incorporated into Fe-oxide phases, which may modify its relative binding strength. Thus, the series is used here as a conceptual reference rather than as an exact predictor of metal–humic complex stability in natural peat matrices.

Lead and copper thus form the most stable complexes. Under different environmental conditions, these relationships may shift. For example, Van Dijk [17], in experiments on metal binding by humic acids, found that at pH 3 approximately 70% of metal ions remain uncomplexed, while at pH 5 the strength of complexation follows the order: Zn^{2+} > Fe^{2+} > Ni^{2+} > Co^{2+} > Mn^{2+} > Mg^{2+} > Ca^{2+} > Ba^{2+}.

This indicates that under mildly acidic conditions, zinc and ferrous iron form the strongest complexes.

As acidity increases (i.e., pH decreases), the stability of metal-organic complexes declines due to protonation of functional groups and displacement of metal ions from the complexes. Conversely, higher pH levels promote the formation of metal complexes with organic ligands: at neutral to slightly alkaline pH, most carboxyl and phenolic groups are deprotonated and actively bind metals [18].

The pH range of the studied peats (Fig. 2c) spans acidic, slightly acidic, neutral, and locally slightly alkaline conditions. pH values vary from 4,40 (acidic conditions in the 0-20 cm horizons of Bilogorshcha and Sknylivka, and in the 60-80 cm horizon of Hamaliivka) to 7,69 (slightly alkaline conditions in the 120-140 cm horizon of Honchary and in the upper layers of Polonychna). Most studied peats exhibit a slightly acidic environment, with an average pH of 5,76, which is typical for peatlands. In general, pH increases with depth. Under the prevailing slightly acidic conditions (pH 5,1-6,0) characteristic of these peatlands, metals do not remain in free ionic form but instead form stable organometallic complexes whose stability increases with depth.

Organic matter (OM) in peat comprises a wide spectrum of compounds, including humic substances (humic acids, fulvic acids, humin), lignin and cellulose residues, amino acids, and low-molecular-weight organic acids. These components play an important role in geochemical processes such as solubility, mobility, concentration, and accumulation of metals. The analyzed peat samples contain substantial amounts of organic matter: on average, OM accounts for 79,53% of the total mass, with values ranging from 62,92% (Bilogorshcha, 20-40 cm) to 90,31% (Hamaliivka, 60-80 cm). Such high OM concentrations indicate the dominance of biogenic material that has undergone varying degrees of anaerobic decomposition.

With depth, the OM content increases in the Bilogorshcha and Hamaliivka profiles (with maximum at 60-80 cm) and decreases in the Honchary profile (with a minimum at 80-100 cm). Vertical distributions of moisture, ash content, pH, and OM (Fig. 2) show pronounced differences between the sections:

Profile 1 (Honchary): Moisture content rises from 21-25% in the upper 40 cm to 43-47% between 40-80 cm, followed by contrasting fluctuations associated with the alternation of more mineralized and more organic horizons. Ash content increases with depth from 16% to 36%, accompanied by a decline in OM to ~63-67% in the lower part of the profile. pH increases from slightly acidic (~6.7) near the surface to neutral–slightly alkaline values (7,3-7,5) at 40-140 cm.

Profile 2 (Bilogorshcha): This peat is generally more humid (W 61-77%) and less ash-rich (A 13-21%), with predominantly acidic pH values (4,5-5,4). With depth, moisture increases and ash content slightly decreases, likely reflecting a diminished influence of the mineral substrate and a more stable hydrological regime.

Profile 3 (Hamaliivka): Moisture content gradually increases from 52% to 78%, while ash content decreases from 31% to 10-15% in the middle part of the profile before rising again to ~15% in the deepest horizons. pH is mostly acidic (4,4-6,1), with a trend toward slightly more neutral conditions at greater depths.

Overall, the peatlands of the Lviv region are characterized by generally high organic matter content and contrasting vertical trends in moisture and ash content, reflecting differences in hydrological conditions, groundwater feeding, and the degree of peat mineralization.

Distribution of mobile forms of trace elements. The general patterns of distribution of mobile forms of chemical elements in the studied peatlands illustrated by their statistical characteristics (mean, minimum and maximum values, median, variance, coefficient of variation, etc.) indicate substantial variability and pronounced spatial heterogeneity in their concentrations (Table 2, Fig. 3).

Lead (Pb) shows an average concentration of 10,78 ppm (range 1,0-132,35 ppm, median 3,58 ppm). The very high coefficient of variation (>230%) and strongly positive skewness and kurtosis values (4,69 and 22,94, respectively) indicate the presence of one or several sharply elevated measur-

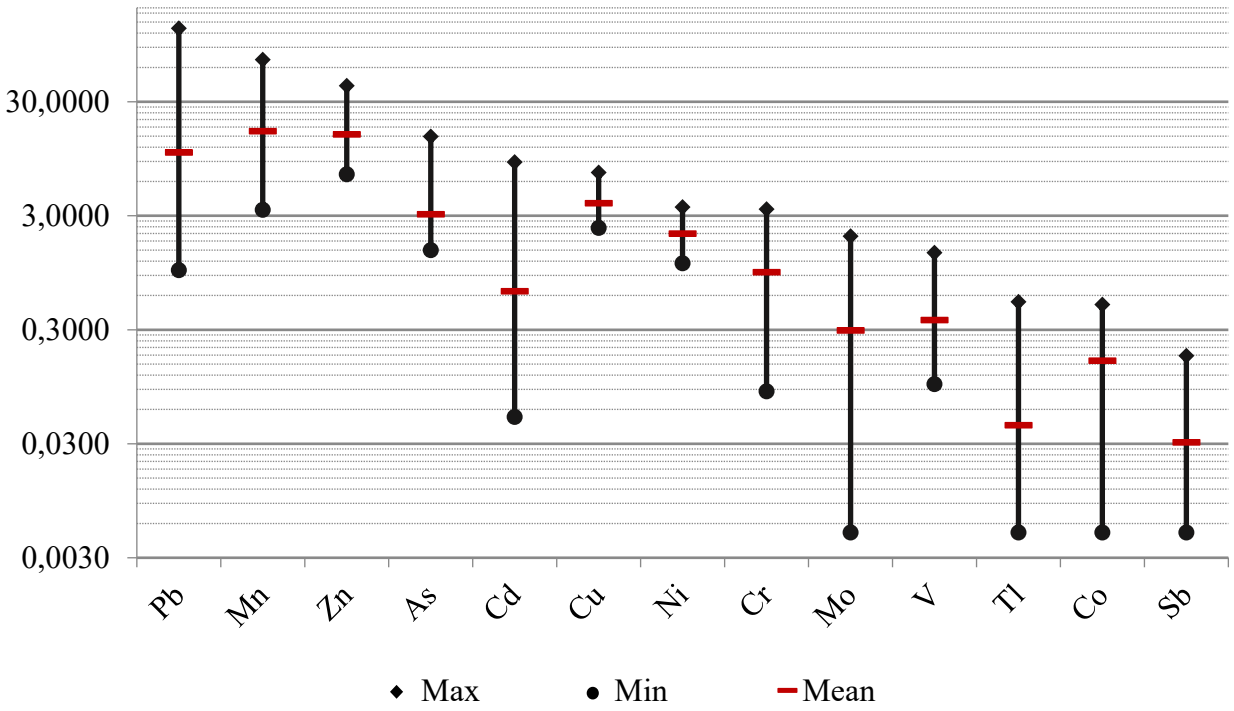


Fig. 3. Geochemical spectrum of accumulation of mobile forms (ppm) of trace elements in the studied peats of Lviv Region.

ements superimposed on a low background typical of most samples. Cadmium (Cd) exhibits similar behavior: the mean value is 0,65 ppm, with a maximum of 8,88 ppm and a coefficient of variation exceeding 260%, reflecting a highly asymmetric distribution dominated by a single anomalous sample.

Zinc (Zn) concentrations range from 6,95 to 41,42 ppm (mean 15,51 ppm, CV ≈ 49%). Copper (Cu) occurs within 2,35-7,18 ppm (mean 3.86 ppm, CV ≈ 39%), and Nickel (Ni) within 1,15-3,58 ppm (mean 2,09 ppm, CV ≈ 34%). A particularly wide concentration range (3,38-70,25 ppm) and high variability (CV ~97%) were recorded for manganese (Mn), likely reflecting heterogeneous redox conditions and the potential involvement of Mn oxides as sorbents for other *PTE*s.

Among anionic and metalloid components, arsenic (As) stands out (mean 3.10 ppm; range 1,5-14,9 ppm), characterized by high skewness (4,25) and kurtosis (19,91), which points to a pronounced deep anomaly. Other elements (Tl, Mo, Sb, Co, Cr, V) occur mainly at trace levels (tenths to hundredths of ppm), yet also display increased variability and asymmetric distributions.

Overall, most elements exhibit coefficients of variation exceeding 40%, a pattern typical for peat ecosystems where local anthropogenic inputs interact with a geogenic background. Similar variability has been reported for peatlands in Latvia, Romania, and Poland [3–8].

Assessment of distribution normality using skewness and kurtosis indicates moderate deviations from normality for Zn, Cu, Ni, Co, and Mn, whereas Pb, As, Tl, and Cd clearly follow a lognormal distribution. This reflects the presence of anomalously high values associated with local sources of input. Wide concentration ranges, high coefficients of variation, and pronounced positive skewness demonstrate that element concentrations vary significantly depending on sampling location. Such contrast and heterogeneity reflect the complex interplay of multiple factors that control the behavior of elements in peatlands, including differences in deposition and fixation conditions, migration processes, hydrological dynamics, biogeochemical transformations, and species-specific uptake patterns of peat-forming plants.

The concentration series of mobile trace elements in the studied peat samples, based on median values, is as follows: Zn > Mn > Pb > Cu > As > Ni > Cr > V > Cd > Co > Mo > (Tl, Sb).

This series highlights which elements dominate in absolute terms in the mobile phase. Biogenic and chalcophilic elements such as Zn and Mn occupy the leading positions, indicating their active participation in biochemical and geochemical processes.

The geochemical spectrum of mobile element forms, expressed through average concentration coefficients normalized to background (median) levels, is as follows (K_{cm}): Tl (8,73), Sb (6,17), Mo (5,69), Cd (3,57), Pb (3,02), V (1,72), Mn (1,62), Cr (1,37), Co (1,28), As (1,20), Cu (1,17), Zn (1,15), Ni (1,13).

This metric provides a more precise indication of anomalous enrichment. Elements with the highest concentration coefficients: Tl, Sb, Mo, Cd, and Pb, exhibit the strongest deviation from background values, reflecting their high mobility and efficient accumulation within the peat deposits.

Comparison of the concentration series of chemical elements, based on median values, in the ash of Lviv region peats [19] with the series of mobile forms obtained in this study clearly demonstrates that the geochemical behavior of elements in peat is strongly controlled by their chemical properties and forms of occurrence. In the series of mobile forms, chalcophile elements (Zn, Pb, Cu) dominate and the potentially hazardous As and Cd. Their prevalence reflects high mobility, a strong tendency to form readily soluble complexes, and consequently a high potential for migration and biological accumulation. In contrast, the concentration series based on ash content is dominated by lithophile elements (Ti, Zr, Sr, Ba) mainly associated with the mineral fraction of peat (clay minerals, quartz, feldspars), which enter peatlands from surrounding geological substrates. Thus, assessing only the total element content in peat is insufficient for a comprehensive understanding of environmental conditions: reliable evaluation of ecological risks and bioavailability requires analysis of mobile forms, which better reflect the actual environmental and biological impact.

Assessment of element accumulation or depletion relative to their Clarke values in the Earth's crust and soils revealed characteristic patterns and allowed us to infer the nature of their geochemical behavior. Based on the concentration coefficient (*CC*) relative to the continental crust values of Rudnick and Gao [20], the studied elements can be grouped as follows: $CC > 1$: Cd (7,259); $CC < 1$: As (0,645), Pb (0,634), Mo (0,269), Zn (0,231), Cu (0,138), Sb (0,077), Tl, Ni (0,044), Mn (0,021), Cr (0,01), Co (0,009), V (0,004).

The geochemical spectrum of mobile element forms, expressed as average concentration coefficients normalized to global soil values [21], is as follows (*CC*): Cd (1,866), Pb (0,899), As (0,516), Mo (0,247), Tl (0,218), Zn (0,172), Cu (0,129), Ni (0,042), Sb (0,031), Co (0,02), Mn (0,017), Cr (0,014), V (0,004).

This spectrum corresponds closely to the classical sequence described in [15] – Pb > Cu > Ni > Co > Zn > Cd > Mn, which reflects the relative affinity of metal ions to bind with common functional groups in the peat matrix. The slight displacement of Cd, Pb, and Zn within our series results from their comparatively elevated concentrations and specific interactions with the peat organic-mineral complex.

Comparison with background concentrations in European soils [22] yields the following: $CC > 1$: Cd (3,447); $CC < 1$: Mo (0,693), Pb (0,66), As (0,541), Zn (0,339), Cu (0,258), Ni (0,135), Sb (0,118), Cr (0,046), Mn (0,037), Co (0,021), V (0,014).

Relative to background values in Ukrainian soils [22], the distribution is similar: $CC > 1$: Cd (4,083); $CC < 1$: Pb (0,926), Mo (0,822), As (0,595), Zn (0,402), Cu (0,254), Sb (0,134), Tl (0,12), Ni (0,094), Cr (0,04), Mn (0,034), Co (0,018), V (0,013).

It is important to emphasize that most soil standards refer to total element concentrations, whereas this study examines the fraction extracted by weak acid – mobile forms. Therefore, actual total concentrations in peat are likely higher, particularly within anomalous horizons.

Vertical distribution of elements in peat profiles.

Profile 1 (Honchary) is the most contrasting in terms of *PTE* concentrations (Table 1). In the upper horizons (0-40 cm), mobile Pb does not exceed 8,9 ppm; Zn ranges from 13,5 to 26,1 ppm; Cd from 0,25 to 0,38 ppm; and Cu from 4,37 to 4,43 ppm. At 40-60 cm, Cu moderately increases to 6,57 ppm, accompanied by a decline in Pb, Zn, and Cd.

The most pronounced anomaly occurs at 60-80 cm: mobile Pb reaches 132,35 ppm, Cd rises to 8,88 ppm, and Zn to 18,62 ppm, while Mn decreases to 3,38 ppm and pH reaches 7,41. This horizon also displays elevated ash content (26,88%) and reduced organic matter (73,12%). Below this level (80-140 cm), Pb, Cd, and Zn concentrations drop sharply (Pb: 1,0-27,7 ppm; Cd: 0,05-1,77 ppm; Zn: 10,7-13,9 ppm), although ash content remains high (up to 36,55%) compared to the upper profile.

The position of the anomalous Pb–Cd horizon in the middle rather than the upper part of the profile suggests secondary metal migration caused by vertical redistribution/sorption/desorption on Fe/Mn oxides, transport with groundwater, or the introduction of material during land reclamation. Similar deep Pb and Cd maxima are known from other peatlands where post-depositional redistribution occurs under variable redox conditions.

Profile 2 (Bilogorshcha) contains maximum Mn (up to 70,25 ppm) and Zn (up to 41,42 ppm) values in the upper 0-20 cm, along with increased Cu (6,82 ppm) and Pb (13,05 ppm). With depth, concentrations of most metals decline, although Zn, Mn, and Ni remain relatively elevated to 40 cm, and Pb and Cu persist at moderate levels down to 120 cm.

All horizons exhibit acidic pH (4,48-5,39) and high moisture (>60%), typical for waterlogged lowland bogs. The surface maxima of Pb, Zn, Cu, and Mn correspond well with atmospheric deposition trends and local pollution inputs documented for

many European peatlands.

Profile 3 (Hamaliivka) is characterized by generally lower metal contents. The upper 0-40 cm contains 3,2-4,4 ppm Pb, 9,5-13,5 ppm Zn, ~0,18-0,27 ppm Cd, and 2,35-2,45 ppm Cu. The middle part (40-80 cm) shows only minor changes, while the lower horizons (100-140 cm) feature a sharp As increase to 14,9 ppm, accompanied by low pH (5,6-6,1) and elevated ash (14-15%).

Deep As enrichment, contrasted with stable concentrations of other metals, suggests a geogenic source such as arsenic-bearing minerals in underlying sediments or inflow of mineralized groundwater. Similar patterns have been reported in peatlands influenced by metalliferous waters and historical mining zones.

The deep arsenic enrichment may reflect a geogenic source, as the Miocene and Upper Cretaceous sedimentary units underlying the peatland locally contain clay-rich horizons and dispersed sulfide minerals capable of releasing As under reducing conditions. Although no direct mineralogical data are available for the studied site, the depth-specific enrichment pattern is consistent with upward diffusion or groundwater-mediated transport from mineralized substrata.

In samples from Artyshchiv and Polonychna, relatively high concentrations of Pb (up to 16,15 ppm), Cu (up to 7,18 ppm), Zn (up to 20,4 ppm), and Mn (up to 35,1 ppm) occur, particularly in surface horizons. Sknylivok displays low to moderate metal concentrations, with high moisture and low ash content.

Overall, all sites exhibit substantial spatial heterogeneity in mobile metal concentrations – consistent with the mosaic nature of *PTE* sources such as atmospheric emissions, local human activities, microrelief variability, and hydrological differences within peatlands.

Against the broader European background, mobile *PTE* concentrations in Lviv region peats can be classified as low to moderate. Compared with industrially affected peatlands in Romania, Poland, and Ireland, where Pb may reach 50-60 ppm and Zn over 40-70 ppm [6, 23], the studied peats contain generally lower levels of Pb, Zn, Cu, and Ni. Concentrations of Mn, As, and Cr are close to or do not exceed typical values for organic soils.

Crucially, these values refer to mobile forms, which are potentially available to plant roots and soil biota. Even relatively low concentrations of such forms may be critical for sensitive species, especially under stress conditions (acid deposition, drought, fires, drainage). At the same time, the results do not indicate systematic exceedance of regulatory limits or significant human health risks during typical peat use, except for specific anomalous horizons, which require detailed assessment before possible agricultural or recreational application.

The relationship between the content of metals and physico-chemical parameters. Correlation analysis (STATISTICA, classical pairwise Pearson correlation analysis) showed several significant statistical relationships between the content of mobile forms of elements and basic physicochemical indicators of peat (Table 3).

Table 3

Correlation matrix of mobile metal forms and physico-chemical parameters in the studied peatlands of Lviv Region

	Pb	Cd	As	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Mo	Sb	Tl	pH	W	Ash	OM
Pb	1,00																
Cd	**0,99**	1,00															
As	-0,08	-0,07	1,00														
V	-0,10	-0,07	-0,06	1,00													
Cr	-0,10	-0,11	**0,73**	0,02	1,00												
Mn	-0,10	-0,10	-0,01	**0,45**	**0,46**	1,00											
Co	0,07	0,04	-0,15	**0,54**	0,15	**0,52**	1,00										
Ni	0,04	0,04	-0,22	**0,77**	0,05	**0,46**	**0,72**	1,00									
Cu	0,12	0,09	-0,14	0,15	0,27	**0,50**	**0,68**	**0,46**	1,00								
Zn	0,19	0,17	-0,25	0,24	0,15	**0,68**	**0,72**	**0,48**	**0,69**	1,00							
Mo	-0,04	-0,07	-0,02	-0,05	0,04	0,15	0,28	0,01	0,38	0,20	1,00						
Sb	0,06	0,06	-0,07	**0,40**	-0,21	-0,14	0,01	0,30	-0,23	-0,10	-0,14	1,00					
Tl	-0,06	-0,08	0,09	-0,20	-0,08	-0,16	-0,02	-0,13	0,05	-0,08	0,32	0,12	1,00				
pH	0,36	0,35	0,13	-0,21	0,03	-0,33	-0,18	-0,37	-0,06	-0,21	0,02	-0,10	0,01	1,00			
W	-0,14	-0,15	0,18	-0,28	0,25	0,16	-0,13	-0,11	0,04	-0,05	0,07	-0,12	0,13	**-0,57**	1,00		
Ash	0,23	0,24	-0,09	0,22	-0,02	0,23	0,15	0,11	0,29	0,19	0,34	-0,30	0,06	**0,44**	**-0,40**	1,00	
OM	-0,23	-0,24	0,09	-0,22	0,02	-0,23	-0,15	-0,11	-0,29	-0,19	-0,34	0,30	-0,06	**-0,44**	**0,40**	**-1,00**	1,00

Bold values indicate significant correlations at $p < 0,05$.

Ash content and organic matter. For most metals (Mo, Cu, Cd, Pb, Mn, V, Zn, Co, Ni), a positive correlation with ash content and a negative correlation with organic matter was identified. This pattern reflects the tendency of these elements to concentrate in the mineral fraction of peat and/or to accumulate in horizons with a more substantial influx of mineral material. In contrast, Sb, As, and Cr display negative correlations with ash content, indicating their relative enrichment in more organogenic, low-ash layers.

pH. pH values exhibit positive correlations with Pb and Cd, and negative correlations with Ni and Mn. This suggests reduced mobility of Ni and Mn under more neutral conditions, while Pb and Cd may form increasingly stable complexes with organic ligands as pH rises.

Relationships between metals. A remarkably strong correlation was observed between Pb and Cd ($r \approx 0,99$), indicating shared sources and nearly identical migration behavior. Strong positive relationships also occur among Zn, Cu, Ni, Co, Mn, and V ($r = 0,46$-$0,77$), as well as between As and Cr ($r \approx 0,73$). These associations align with multivariate statistical results from other European peatlands [6], where similar clusters of elements reflect either geogenic signatures or anthropogenic inputs.

The results confirm the crucial role of mineral admixture and acid–base conditions in regulating metal mobility in peat, consistent with current concepts of *PTE* chemical speciation in organic soils [9].

To further clarify geochemical associations, correlation profiles were constructed (Fig. 4), enabling a detailed examination of element relationships and their behavior during peat formation. Analysis of the ranked correlation coefficients revealed four principal paragenetic associations of mobile forms of the studied elements: (1) Zn – Ni – Cu – Co – Mn; (2) Sb – V; (3) Pb – Cd – Tl; (4) Cr – As.

These associations reflect shared sources, similar bonding mechanisms, or coordinated migration pathways within the peat deposit.

The strongly positive skewness and kurtosis values for Pb, As, Tl and Cd suggest a distribution close to log-normal; however, this conclusion is tentative, as formal normality tests (e.g., Shapiro-Wilk or Kolmogorov-Smirnov) were not performed. These deviations imply heterogeneous inputs and the presence of anomalous samples rather than a fully log-normal statistical structure.

Sources and mechanisms of PTE accumulation in the peats of the Lviv region.

The combination of statistical characteristics, vertical distribution patterns, and correlation analysis allows several inferences to be drawn regarding the sources and processes controlling *PTE* distribution in the studied peatlands.

Elevated concentrations of Pb, Zn, and Cu in the surface horizons of the Bilogorshcha peatland, as well as in composite samples from Artyshchiv and Polonychna, likely reflect the accumulation of atmospheric aerosols originating from transport emissions, fuel combustion, and local economic activities. Such profiles, with *PTE* maxima in the upper 20-30 cm, are typical of many ombrotrophic and mesotrophic peatlands across Europe [6].

Deep As enrichment in the lower part of the Hamaliivka profile, along with an increase in ash content with depth in several profiles, indicates a substantial contribution from mineral material derived from underlying rocks and groundwater. Similar peatlands have shown [8] that elements prone to binding with sulfides or Fe/Mn oxides (As, Cr, Ni, Co) may accumulate in transition zones between peat and mineral subsoil.

The pronounced mid-profile Pb–Cd anomaly in Honchary, combined with low concentrations above and below this horizon, suggests secondary migration or reworking processes – such as redistribution driven by fluctuating redox conditions, groundwater movements, or historical anthropogenic disturbances. Comparable redistributions of Pb, Zn, and Cd, driven by sulfide dissolution/precipitation and varying stability of technogenic particles, have been documented in Romanian and Polish peatlands [6, 8].

The negative correlation of most metals with organic matter and their positive correlation with ash content indicate predominant fixation to mineral phases (Fe/Mn oxides, clay minerals). High organic matter content in the upper, low-ash horizons likely promotes complexation with humic substances, forming stable organometallic compounds. These observations agree with modern concepts of competitive sorption between organic and mineral phases in peat soils [9].

Conclusions

1. Physico-chemical characteristics. Peat deposits of the Lviv region are characterized by high organic matter content (~80% on average), moderate ash content (~20%), a wide moisture range (15-87%), and pH values spanning acidic to slightly alkaline conditions (4,4-7,7). Vertical physico-chemical profiles vary markedly between peatlands, reflecting differences in hydrology and mineralization.

2. Average metal concentrations. The average concentrations of mobile Pb, Zn, Cd, Cu, Ni, Mn, and Cr are 10,8, 15,5, 0,65, 3,86, 2,09, 16,6, and 0,96 ppm, respectively. Most elements show high coefficients of variation and asymmetric distributions, indicating mosaic patterns of accumulation and the presence of local anomalies.

3. Local anomalies. The most pronounced Pb–Cd anomaly (132,35 ppm Pb and 8,88 ppm Cd) occurs at 60-80 cm in the Honchary peatland, contrast-

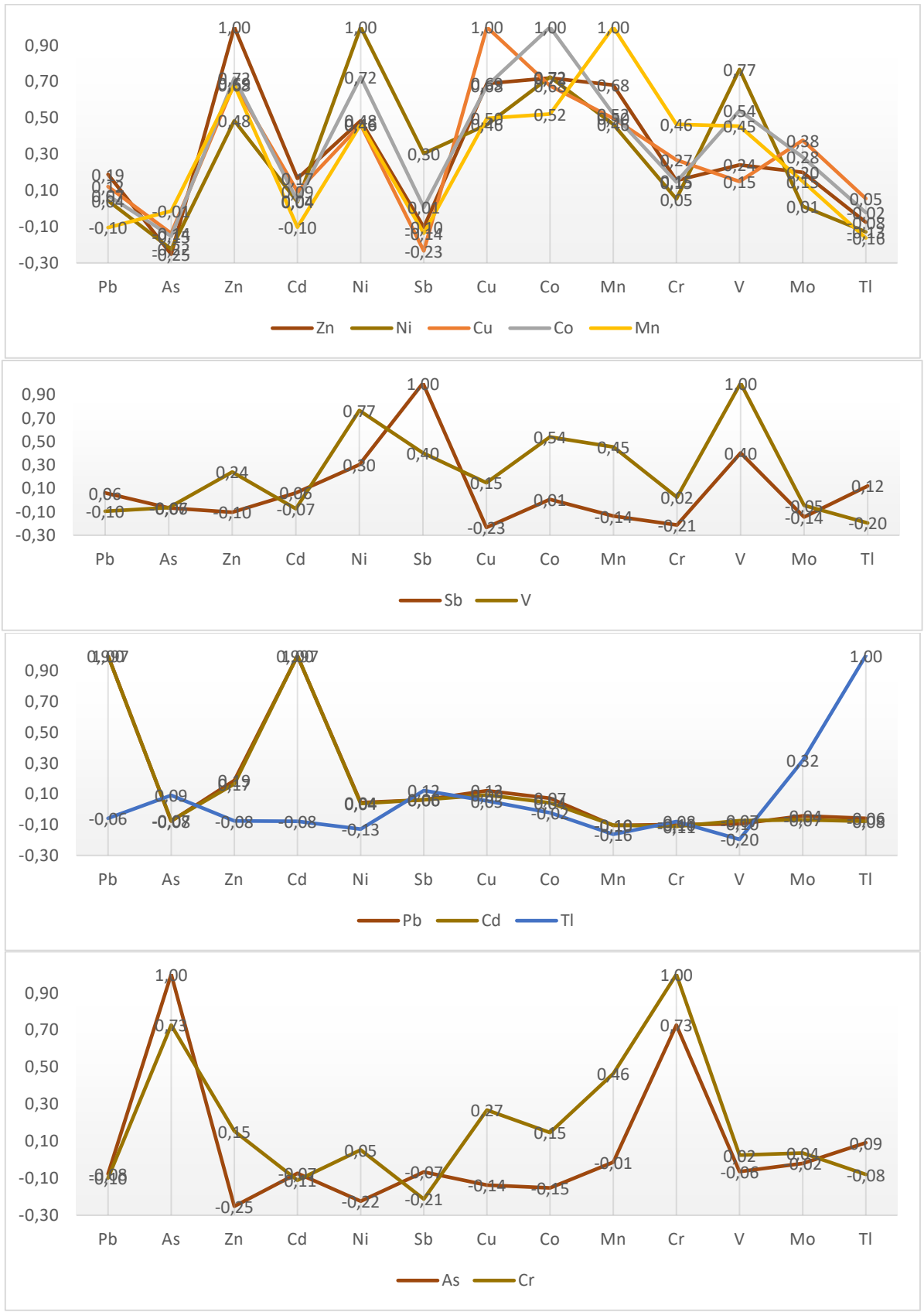


Fig. 4. Correlation profiles of the distribution of mobile metal forms in the studied peatlands of Lviv Region

ing with generally low values elsewhere. In the Hamaliivka profile, notable As enrichment (up to 14,9 ppm) occurs in deeper horizons. Most other sites show elevated Zn, Cu, Mn, and Pb in surface layers.

4. Comparison with regulatory and background values. Comparison with national and European indicative soil standards shows that the average content of mobile *PTE* in Lviv region peats does not

exceed background levels and remains significantly below pollution thresholds except for a distinct Pb–Cd anomaly in Honchary. Although the regional average concentrations of mobile *PTE* forms remain low and generally fall within background levels, the presence of sharp local anomalies, such as the Pb–Cd enrichment in the Honchary profile, indicates that the contamination pattern is spatially heterogeneous. Therefore, regional assessments should distinguish between background conditions and localized anomalies, which may reflect site-specific geochemical or anthropogenic factors rather than regional contamination.

5. Controls on metal mobility. Correlation analysis confirms the key role of ash content, organic matter, and pH in regulating metal mobility. Strong positive correlations occur between Pb and Cd, and among Zn, Cu, Ni, Co, Mn, and V, indicating shared sources and similar accumulation mechanisms.

6. Scientific and practical significance. The findings expand current knowledge on the geochemistry of European peatlands and provide the first comprehensive characterization of mobile *PTE* forms in the Lviv region. These results may inform the development of regional ecological assessment criteria, guide rational peatland use, and support further environmental monitoring. These findings also provide baseline information relevant for evaluating the suitability of peat deposits for future economic use, including agricultural substrates, land reclamation materials, or other low-impact applications.

7. Although no widespread exceedance of indicative thresholds was detected, localized anomalies, particularly the Pb–Cd horizon in the Honchary profile, may pose potential ecological risks if hydrological conditions change (e.g., drainage, drying, or enhanced groundwater flux). Under such scenarios, remobilization of metal-bearing phases could increase the availability of *PTE* to vegetation, soil biota, or adjacent water bodies. These zones therefore warrant site-specific monitoring before any agricultural or recreational use of peat from such layers.

Acknowledgements

The authors sincerely thank Alpinus Chemia Sp. z o.o. (Alpinus Chemia Ltd., Solec Kujawski, Poland) – especially Maciej Jaranowski, President of the Board, and Katarzyna Szwagrzak, Head of the Analytical Laboratory for providing access to the company's laboratory facilities, instruments, and analytical equipment.

Bibliography

1. *Osborne, C., Gilbert-Parkes, S., Spiers, G., Lamit, L. J., Lilleskov, E. A., Basiliko, N., & Watmough, S. (2024). Global patterns of metal and other element enrichment in bog and fen peatlands. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 86(2), 125-139. https://doi.org/10.1007/s00244-024-01051-3*
2. *Thalassinos, G., Petropoulos, S. A., Grammenou, A., & Antoniadis, V. (2023). Potentially toxic elements: A review on their soil behavior and plant attenuation mechanisms against their toxicity. Agriculture, 13(9), 1684. https://doi.org/10.3390/agriculture13091684*
3. *Klavins, M., Silamikele, I., Nikodemus, O., Kalnina, L., Kuske, E., Rodinov, V., & Purmalis, O. (2009). Peat properties, major and trace element accumulation in bog peat in Latvia. Baltica, 22(1), 37–49.*
4. *Silamikele, I., Klavins, M., & Nikodemus, O. (2011). Major and trace element distribution in the peat from ombrotrophic bogs in Latvia. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 46(7), 805–812. https://doi.org/10.1080/10934529.2011.572005*
5. *Krumins, J., Kuske, E., & Klavins, M. (2011). Major and Trace Element Accumulation in Fen Peat from Elki and Viki Mires in Western Latvia. Material Science & Applied Chemistry, (24), 71-81.*
6. *Adumitroaei, M. V., Iancu, G. O., Răţoi, B. G., Doru, C. S., & Sandu, C. M. (2018). Spatial distribution and geochemistry of major and trace elements from Mohoş peatland, Harghita Mountains, Romania. The Holocene, 28(12), 1936–1947. https://doi.org/10.1177/0959683618798174*
7. *Fiałkiewicz-Kozieł, B., Smieja-Król, B., & Palowski, B. (2011). Heavy metal accumulation in two peat bogs from southern Poland. Studia Quaternaria, 28, 17–24.*
8. *Smieja-Król, B., Fiałkiewicz-Kozieł, B., Sikorski, J., & Palowski, B. (2010). Heavy metal behaviour in peat – A mineralogical perspective. Science of the Total Environment, 408(23), 5924–5931. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.08.032*
9. *Lu, Z., Ning, Y., Liu, C., Song, X., Pang, Y., Li, Q., ... & Zeng, L. (2025). Geochemical Regulation of Heavy Metal Speciation in Subtropical Peatlands: A Case Study in Dajiuhu Peatland. Land, 14(6), 1256. https://doi.org/10.3390/land14061256*
10. *Інститут ґрунтознавства та агрохімії ім. О.Н. Соколовського Української Академії аграрних наук. (2008). ДСТУ EN 13040:2005. Меліоранти ґрунту та середовища росту. Готування проб до хімічного та фізичного аналізу, визначення вмісту сухої речовини, вмісту вологи та лабораторно ущільненої насипної щільності, 14.*
11. *Технічний комітет стандартизації «Ґрунтознавство» (ТК 142) та Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії ім. О. Н. Соколовського» (2015). ДСТУ 7942:2015 Якість ґрунту. Визначення зольності торфу і торфового ґрунту, 9.*
12. *Інститут сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН (2016). ДСТУ 7882:2015 Торф і продукти його перероблення для сільського господарства. Методи визначення обмінної й активної кислотності, 6.*

13. Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О. Н. Соколовського Української академії аграрних наук. (2006). ДСТУ 4405:2005. Якість ґрунту. Визначення рухомих сполук фосфору і калію за методом Кірсанова в модифікації ННЦ ІГА. Київ: Держспоживстандарт України, 2006. 17.
14. Брадіс, Є. М., Кузьмичов, А. І., Андрієнко, Т. Л., & Батячов, Є. Б. (1973). Торфово-болотний фонд УРСР, його районування та використання. К.: Наук. думка, 263.
15.Irving, H. M. N. H., & Williams, R. J. P. (1948). Order of stability of metal complexes. Nature, 162(4123), 746-747.
16. Schnitzer, M., & Khan, S. U. (1972). Humic substance in the environment. Mareel Dekker. Inc. N YP, 363, 29-54.
17. Van Dijk, H. (1971). Cation binding of humic acids. Geoderma, 5(1), 53-67.
18. Boguta, P., & Sokołowska, Z. (2013). Interactions of humic acids with metal ions. Acta Agrophysica, 2(AAM004-), 113.
19. Яковенко, М., Хоха, Ю., & Любчак, О. (2022). Геохімічні особливості накопичення і міграції важких металів у торфах Львівської області. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», (56), 105-121. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-56-07
20. Rudnick, R. L., & Gao, S. Composition of the continental crust. Treatise Geochem. 2003; 3: 1–64. DOI: 10.1016/B0-08-043751-6/03016-4
21. Bowen, H. J. M. (1979). Environment Chemistry of the Elements. London; New-York; Toronto; Sydney; San Francisco: Academic Press, 333.
22. Клос, В. Р., Бірке, М., Жовинський, Е. Я., Акінфієв, Г. О., Амашукелі, Ю. А., & Кламенс, Р. (2012). Регіональні геохімічні дослідження ґрунтів України в рамках міжнародного проекту з геохімічного картування сільськогосподарських та пасовищних земель Європи (GEMAS). Пошукова та екологічна геохімія, 1(12), 51–66.
23. Glina, B., Kowalska, J. B., Łuczak, K., Mazurek, R., Spychalski, W., & Mendyk, Ł. (2021). Potentially toxic elements in fen peatland soils located near lignite-fired power plants in Central Poland. Geoderma Regional, 25, e00370. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00370 .

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

References

1. Osborne, C., Gilbert-Parkes, S., Spiers, G., Lamit, L. J., Lilleskov, E. A., Basiliko, N., & Watmough, S. (2024). Global patterns of metal and other element enrichment in bog and fen peatlands. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 86(2), 125–139. https://doi.org/10.1007/s00244-024-01051-3
2. Thalassinos, G., Petropoulos, S. A., Grammenou, A., & Antoniadis, V. (2023). Potentially toxic elements: A review on their soil behavior and plant attenuation mechanisms. Agriculture, 13(9), 1684. https://doi.org/10.3390/agriculture13091684
3. Klavins, M., Silamikele, I., Nikodemus, O., Kalnina, L., Kuske, E., Rodinov, V., & Purmalis, O. (2009). Peat properties and trace element accumulation in bog peat in Latvia. Baltica, 22(1), 37–49.
4. Silamikele, I., Klavins, M., & Nikodemus, O. (2011). Major and trace element distribution in the peat from ombrotrophic bogs in Latvia. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 46(7), 805–812. https://doi.org/10.1080/10934529.2011.572005
5. Krumins, J., Kuske, E., & Klavins, M. (2011). Major and trace element accumulation in fen peat from Elki and Viki Mires in Western Latvia. Material Science & Applied Chemistry, 24, 71–81.
6. Adumitroaei, M. V., Iancu, G. O., Răţoi, B. G., Doru, C. S., & Sandu, C. M. (2018). Spatial distribution and geochemistry of major and trace elements from Mohoș peatland. The Holocene, 28, 1936–1947. 2 https://doi.org/10.1177/0959683618798174
7. Fiałkiewicz-Kozieł, B., Smieja-Król, B., & Palowski, B. (2011). Heavy metal accumulation in peat bogs from southern Poland. Studia Quaternaria, 28, 17–24.
8. Smieja-Król, B., Fiałkiewicz-Kozieł, B., Sikorski, J., & Palowski, B. (2010). Heavy metal behaviour in peat: A mineralogical perspective. Science of the Total Environment, 408, 5924–5931. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.08.032
9. Lu, Z., Ning, Y., Liu, C., Song, X., Pang, Y., Li, Q., ... Zeng, L. (2025). Geochemical regulation of heavy metal speciation in subtropical peatlands. Land, 14(6), 1256. https://doi.org/10.3390/land14061256
10. Instytut gruntoznavstva ta agrohimii im. O. N. Sokolovskoho. (2008). DSTU EN 13040:2005. Soil improvers and growth media. Sample preparation. Kyiv. [in Ukrainian]
11. Tekhnichnyi komitet «Hruntoznavstvo»; NNTs IHA im. O. Sokolovskoho. (2015). DSTU 7942:2015 Soil quality. Determination of peat ash content. Kyiv. [in Ukrainian]
12. Instytut silskohospodarskoi mikrobiolohii NAAN. (2016). DSTU 7882:2015. Peat and peat products. Determination of acidity. Kyiv. [in Ukrainian]
13. Instytut gruntoznavstva ta agrohimii im. O. N. Sokolovskoho. (2006). DSTU 4405:2005. Soil quality. Determination of mobile P and K. Kyiv. [in Ukrainian]
14. Bradis, Ye. M., Kuzmychov, A. I., Andriienko, T. L., & Batiachov, Ye. B. (1973). Peat-bog resources of the Ukrainian SSR. Kyiv: Naukova dumka. [in Ukrainian]

15. Irving, H. M. N. H., & Williams, R. J. P. (1948). Order of stability of metal complexes. Nature, 162, 746–747. https://doi.org/10.1038/162746a0
16. Schnitzer, M., & Khan, S. U. (1972). Humic substances in the environment. Marcel Dekker.
17. Van Dijk, H. (1971). Cation binding of humic acids. Geoderma, 5(1), 53–67. https://doi.org/10.1016/0016-7061(71)90024-3
18. Boguta, P., & Sokołowska, Z. (2013). Interactions of humic acids with metal ions. Acta Agrophysica, 2, 113.
19. Yakovenko, M., Khokha, Yu., & Liubchak, O. (2022). Geochemical features of heavy metal accumulation and migration in peats of the Lviv region. Visnyk of Kharkiv National University. Geology. Geography. Ecology, 56, 105–121. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-56-07
20. Rudnick, R. L., & Gao, S. (2003). Composition of the continental crust. Treatise on Geochemistry, 3, 1–64. https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/03016-4
21. Bowen, H. J. M. (1979). Environmental Chemistry of the Elements. Academic Press.
22. Klos, V. R., Birke, M., Zhovynskyi, E. Ya., Akinfiiev, H. O., Amashukeli, Yu. A., & Klamens, R. (2012). Regional geochemical study of soils of Ukraine. Poshukova ta ekolohichna heokhimiia, 1(12), 51–66. [in Ukrainian]
23. Glina, B., Kowalska, J. B., Łuczak, K., Mazurek, R., Spychalski, W., & Mendyk, Ł. (2021). Potentially toxic elements in fen peatland soils located near lignite-fired power plants. Geoderma Regional, 25, e00370. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00370

Рухомі форми мікроелементів у торфових відкладах Львівської області: вертикальний розподіл та зв'язок із фізико-хімічними властивостями

Мирослава Яковенко [1]
к. геол. н., ст. досл., ст. наук. співробітник,
[1] Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН України, Львів, Україна;
Юрій Хоха [1]
д. геол. н., ст. дослідник, пров. наук. співробітник;
Мирослав Павлюк [1]
академік НАН України, д. геол.-мін. н, професор, радник при дирекції

У роботі досліджено вертикальний розподіл рухомих форм важких елементів (Pb, Tl, Zn, Cd, Cu, As, Sb, Mo, Ni, Co, Mn, Cr, V) у торфових відкладах Львівської області та встановлено їх зв'язок із базовими фізико-хімічними параметрами (вологість, зольність, pH, вміст органічної речовини). Відібрано 26 зразків з глибинного інтервалу 0–140 см з кроком 20 см (для трьох розрізів) та з верхніх шарів інших торфовищ; рухомі форми елементів екстрагували 0,2 M HCl і визначали методом атомно-емісійної спектроскопії з індуктивно-зв'язаною плазмою (ICP-AES). Проведено дослідження залежності концентрацій хімічних елементів від глибини та фізико-хімічних властивостей торф'яного шару, взаємозв'язків і взаємодії між вмістом мікроелементів та іншими характеристиками торфу й оцінки можливих джерел їх накопичення за допомогою статистичного аналізу. Встановлено, що середній вміст рухомих форм Pb, Zn, Cd, Cu, Ni, Mn та Cr становив відповідно 10,8; 15,5; 0,65; 3,86; 2,09; 16,6 та 0,96 мг/кг (ppm), при дуже високих коефіцієнтах варіації для Pb, Cd, Tl, Mo, Sb, Mn (більше 80 %), що вказує на мозаїчну просторову структуру розповсюдження елементів. Максимальні значення Pb (132,35 мг/кг) та Cd (8,88 мг/кг) зафіксовані у горизонті 60–80 см торфовища Гончари, а підвищений вміст As (14,9 мг/кг) – у нижній частині профілю Гамаліївка. У більшості зразків концентрації рухомих форм елементів є значно нижчими за орієнтовні нормальні значення для ґрунтів та порогові рівні забруднення, встановлені для орних ґрунтів у країнах ЄС, що свідчить про загалом низький рівень техногенного навантаження за наявності локальних аномалій вмісту свинцю та кадмію. Вологість торфу в середньому становила 59 % (15–87 %), зольність – 20 %, вміст органічної речовини – близько 80 %, pH варіював від кислого до слабколужного (4,4–7,7). Для профілів Білогорща та Гамаліївка характерне зростання вологості з глибиною, тоді як у Гончарах спостерігається чергування більш зволожених і відносно підсушених горизонтів. Встановлено позитивний зв'язок вмісту більшості металів із зольністю та негативний – з вмістом органічної речовини, а також істотну кореляцію між Zn, Cu, Ni, Co, Mn та V, що відображає спільність джерел та механізмів акумуляції; найвищу кореляцію ($r \approx 0,99$) виявлено між рухомими формами Pb і Cd, що підтверджує їх спільну геохімічну поведінку в торфі. Результати свідчать, що торфовища Львівщини є ефективним геохімічним бар'єром для акумуляції потенційно токсичних елементів, водночас локальні глибинні аномалії Pb–Cd та As можуть бути пов'язані як із геогенною складовою, так і з історичними епізодами атмосферного надходження. Отримані дані уточнюють уявлення про геохімію українських торфовищ та формують основу для подальшої оцінки екологічних ризиків і придатності торфу до господарського використання.

***Ключові слова**: торф, торфовище, геохімія, мікроелементи, рухомі форми, накопичення, Україна, Львівський регіон, ICP-AES.*

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу
Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 11 жовтня 2025 р.
Прийнята 18 листопада 2025 р.

ГЕОГРАФІЯ

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-10
УДК 911.3:625.711.1(477.64)

Надійшла 4 квітня 2025 р.
Прийнята 5 жовтня 2025 р.

Географічний аналіз автомобільної транспортної мережі Запорізької області

Олег Байтеряков [1]
к. геогр. н., доцент кафедри географії та туризму,
[1] Мелітопольський державний педагогічний університет
імені Богдана Хмельницького, Запоріжжя, Україна,
e-mail: o.baiteriakov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7449-693X;
Денис Копилов [2]
студент, [2] Національний університет «Києво-Могилянська академія», Київ, Україна,
e-mail: d.kopylov@ukma.edu.ua, https://orcid.org/0009-0009-6510-7654

Стаття присвячена виявленню стану і просторових відмінностей рівня забезпеченості автомобільною транспортною мережею території Запорізької області та її адміністративних районів напередодні повномасштабної російської агресії. На підставі розрахунків проведено оцінку і порівняльний аналіз рівня забезпеченості автомобільною транспортною мережею Запорізької області в цілому та її адміністративних районів за показниками щільності автодоріг за площею території і населенням, середньозваженим показником категорійності автошляхів, за узагальненими коефіцієнтами Енгеля і Гольца. Проведено порівняльний аналіз каркасів автотранспортних мереж та виявлено їх вплив на часову автотранспортну доступність адміністративних районів області за допомогою розрахованих і побудованих відповідних карт ізохрон. Райони області мають своєрідні каркаси автранспортних мереж, що впливають на доступність території. В Запорізькому і Мелітопольському районах вони мають радіальну з елементами радіально-кільцевої, в Пологівському – радіально-вузлову, в Бердянському – радіальну з елементами циклічності, в Василівському – циклічну конфігурацію. Зіставлення конфігурації території районів і систем розселення в них дозволяє вважати каркаси районних автомереж наближеними до оптимальних. Незважаючи на відмінності в площі територій, кількості населених пунктів, розташуванні районних центрів та довжині автомобільних шляхів, всі райони області мають досить схожу часову доступність до райцентрів. Це свідчить про раціональний адміністративний поділ області на райони. Враховуючи конфігурацію території області і розташування м. Запоріжжя, каркас обласної автотранспортної мережі можна вважати оптимальним, він забезпечує відносно рівномірне зростання часової доступності при віддаленні від обласного центру. Однак значна віддаленість південної частини області і, відповідно, її велика часова відстань викликають питання про прискорений розвиток Мелітополя і Бердянська у повоєнний час як субрегіональних центрів.

***Ключові слова**: автотранспортна мережа, категорія автошляхів, автотранспортна доступність, ізохрони, адміністративний район, щільність автотранспортних шляхів, коефіцієнт Енгеля, коефіцієнт Гольца, часова доступність.*

Як цитувати: Байтеряков Олег, Копилов Денис (2025). Географічний аналіз автомобільної транспортної мережі Запорізької області. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*, (63), 128-144. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-10

In cites: Baiteriakov Oleg, Kopylov Denys (2025). Geographical analysis of the automobile transport network of Zaporizhzhia region. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 128-144. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-10 [in Ukrainian]

Постановка проблеми. Автомобільна транспортна мережа у сучасних умовах не лише сполучає між собою населені пункти, але й забезпечує доступність всієї території для потреб населення, бізнесу та військової галузі. Протяжність мережі, її конфігурація та якість доріг значною мірою визначають ступінь соціально-економічного розвитку регіону, а також визначають раціональність його адміністративно-територіального поділу. Необхідність дослідження довоєнного стану транспортної галузі тимчасово окупованих територій пояснюється необхідністю інтеграції її після деокупації у загальну транспортну мережу України у повоєнний час з врахуванням попередніх проблем. Відтак, питання про дослідження автотранспортної мережі Запорізької області та її адміністративних районів виявляється актуальним.

Новизна дослідження. На підставі власних розрахунків проведено оцінку і порівняльний аналіз рівня забезпеченості автомобільною транспортною мережею Запорізької області в цілому та її адміністративних районів за показниками щільності автодоріг за площею території і населенням, середньозваженим показником категорійності автошляхів, за узагальненими коефіцієнтами Енгеля і Гольца. Проведено порівняльний аналіз конфігурації каркасів районних

© Байтеряков Олег, Копилов Денис, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

автотранспортних мереж та виявлено їх вплив на часову автотранспортну доступність адміністративних районів області. Запропоновано шляхи раціоналізації довоєнного стану автотранспортної мережі Запорізької області, що впливатиме на ефективність її функціонування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розгляду географічних аспектів формування і функціонування автомобільних транспортних мереж присвячені численні публікації вітчизняних і закордонних дослідників. Це пояснюється значенням, яке відіграють автотранспортні мережі у сучасних логістичних системах більшості регіонів світу.

Загальні теоретичні питання формування і дослідження транспортних мереж в цілому, і автомобільних зокрема, висвітлюються у працях таких фахівців як Н.М. Бондар [7]; П.М. Гащук, і С.Ю. Тимошенко [8]; О.М. Загурський [13]; К.В. Мезенцев [15]; Г.П. Підгрушний, В.П. Нагірна, М.І. Фащевський [21]; У.М. Плекан, О.Л. Ляшук, Н.Я. Рожко і О.П. Цьонь [22]; С.О. Пугач, С.В. Новосад [25]; Г.Ю. Родащук [26] та ін.

Проблеми інтеграції транспортної системи України в європейську транспортну мережу розглядають H.I. Nesterenko, M.I. Muzykin, O.H. Strelko, S.I. Bibik, A.O. Aleksieieva [36]; особливості конфігурації і функціонування автомобільних транспортних мереж в країнах Європи висвітлюють Г.І. Нестеренко, М.І. Музикін, С.І. Бібік і А.Ю. Швайко [19]; особливості розвитку міжнародних автомобільних перевезень в рамках транспортних коридорів Європи та України представили А.П. Науменко і Д.О. Макаревич [17].

Особливості автотранспортних мереж окремих регіонів України досліджувались багатьма фахівцями. Зокрема, М.М. Мельнійчук і С.І. Ковальчук аналізували автомобільну транспортну доступність основних рекреаційних населених пунктів північно-західного регіону України [16]; І.О. Пилипенко виявляв вплив автотранспортної мережі на зміни периферійності адміністративних одиниць Херсонської області [20]; Ю.Ю. Сільченко, Л.Л. Семенюк та А.В. Зарубіна проаналізували вплив транспортної доступності на соціально-економічний розвиток Кіровоградської області [27]; В.С. Грицевич і М.І. Сеньків виявляли особливості автотранспортної мережі у Західному регіоні України [9]; Y. Borsuk провів топологічний аналіз автомобільної та залізничної мережі українсько-польського прикордоння (на прикладі Львівської області та Підкарпатського воєводства) [32]; А.В. Кудряшов і О.О. Мазуренко проаналізували маршрутну автотранспортну мережу на прикладі міста Марганець [14]; Р.Р. Гудима наводить оцінку рівня транспортної забезпеченості на прикладі прикордонного регіону України [10].

Значна увага різноманітним питанням розвитку і функціонуванню автотранспортних мереж останнім часом приділяється у багатьох країнах світу. Так R. Kutadinata, S. Dey та D. Leow порівнюють відносну мобільність мережі громадського транспорту з подорожами приватними автомобілями в Австралії на прикладі Мельбурну [35]. H. Zhang, Y. Liu, B. Shi, J. Jia, W. Wang та X. Zhao аналізують просторово-часові характеристики роботи мереж громадського автотранспорту в Китаї на прикладі міста Сючан [40]. A. Roy, D. Fuller, T. Nelson та P. Kedron розглядали питання оцінки ролі географічного контексту у визначенні способу пересування на прикладі трьох міст Канади – Монреалю, Сент-Джонсу та Ванкуверу [38]. M. Jakimavičius і M. Burinskienė пропонують системний аналіз автомобільної транспортної системи та визначають особливості часової доступності адміністративно-територіальних одиниць Литви [34]. P. Sajous, P. Salze і V. Bailly-Hascoët на підставі компоненту мобільності європейської дослідницької програми XTERM досліджують роль і майбутнє автотранспорту і, відповідно, автотранспортної мережі у Франції [39]. S.S. Hla надає географічний аналіз транспортної системи Центральної М'янми [33].

Особливої уваги заслуговує книга J.P. Rodrigue «Географія транспортних систем», де детально розглядаються питання формування транспортних систем, географії транспортних мереж, вплив транспорту на економіку, суспільство і навколишнє середовище, види транспорту та ін. Окрему увагу приділено розгляду методів різноманітних географічних досліджень транспортних систем і мереж [37].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. До повномасштабної військової російської агресії публікацій, що розглядають стан і розвиток автомобільної транспортної мережі Запорізької області було небагато. Практично можна визначити лише праці Н.Г. Фатюхи [30], що присвячені статистичній оцінці розвитку і функціональним питанням роботи автомобільного транспорту області. К.Г. Неліпа в рамках дослідження суспільно-географічної трансформації системи розселення стисло розглядала топологічну схему міст обласного значення і районних центрів Запорізької області до реформи адміністративно-територіального устрою 2020 р. [18]. Детальний аналіз автотранспортної мережі області із застосуванням топологічних методів станом на 2021 р. наведено у статті О. Байтерякова і В. Воронової [3; 6]. Постає питання про оцінку і порівняльний аналіз рівня забезпеченості автомобільною транспортною мережею Запорізької області в цілому та її адміністр-

ративних районів за основними кількісними показниками до початку російської військової агресії.

Мета і завдання дослідження. Мета – виявити просторові відмінності рівня забезпеченості автомобільною транспортною мережею території Запорізької області напередодні повномасштабного російського вторгнення. Для досягнення мети дослідження було поставлено такі завдання:

- провести розрахунки і виявити рівень забезпеченості автомобільною транспортною мережею адміністративних одиниць Запорізької області;
- здійснити порівняльний аналіз рівня забезпеченості автомобільною транспортною мережею адміністративних районів Запорізької області;
- визначити і порівняти часову транспортну доступність території адміністративних районів Запорізької області.

Матеріали і методи досліджень. У сучасній науковій літературі запропоновано цілу низку різноманітних методичних підходів до оцінювання транспортної мережі території, що суттєво різняться між собою. Тому на підставі аналізу їх переваг та недоліків необхідно обрати відповідну методику.

Найбільш розповсюдженими характеристиками транспортної мережі і забезпеченості нею території є протяжність транспортних шляхів та їх щільність або густота. Територіальний показник щільності транспортних шляхів розраховується за формулою [12; 28]:

$$\boldsymbol{ds} = \frac{\boldsymbol{L}}{\boldsymbol{S}} \qquad (1.1)$$

де $\boldsymbol{ds}$ – щільність транспортних шляхів за площею регіону;

$\boldsymbol{L}$ – довжина шляхів сполучення, км;

$\boldsymbol{S}$ – площа регіону, тис. км^2.

Тобто даний показник відображає відношення протяжності транспортних шляхів до площі території дослідження. Однак потреба у транспорті залежить не лише від площі території, але і від кількості населення, що там мешкає. Тому для характеристики цієї залежності використовують показник щільності транспортних шляхів за населенням, що розраховується за формулою [12; 28]:

$$\boldsymbol{dh} = \frac{\boldsymbol{L}}{\boldsymbol{H}} \qquad (1.2)$$

де $\boldsymbol{d_h}$ – щільність транспортних шляхів за населенням регіону;

$\boldsymbol{L}$ – довжина шляхів сполучення, км;

$\boldsymbol{H}$ – чисельність населення регіону, тис. осіб.

Для відображення співвідношення довжини доріг різних категорій певної території використовується середньозважений показник категорійності автомобільних шляхів, що розраховується за формулою:

$$\boldsymbol{K} = \frac{\boldsymbol{1x_1 + 2x_2 + 3x_3 + 4x_4 + 5x_5}}{\boldsymbol{x}} \qquad (1.3)$$

де: $\boldsymbol{K}$ – середньозважений показник категорійності автодоріг;

$\boldsymbol{x}$ – загальна довжина автодоріг території;

$\boldsymbol{x_n}$ – довжина доріг певної категорії (1-5).

При цьому, найменші значення середньозваженого показника категорійності автодоріг свідчать про кращу ситуацію на певній території.

Для узагальненої характеристики транспортної забезпеченості території з урахуванням і площі і чисельності населення використовується формула Енгеля [12; 21; 28]:

$$\boldsymbol{d_E} = \frac{\boldsymbol{L}}{\sqrt{\boldsymbol{SH}}} \qquad (1.4)$$

де: $\boldsymbol{dE}$ – коефіцієнт Енгеля;

$\boldsymbol{L}$ – довжина шляхів сполучення, км;

$\boldsymbol{S}$ – площа регіону, км2;

$\boldsymbol{H}$ – чисельність населення, тис. осіб.

Транспортні шляхи з'єднують між собою населені пункти, які також впливають на конфігурацію транспортної мережі, тому для характеристики транспортної доступності території доцільно враховувати кількість населених пунктів. Для цього використовується узагальнююча формула Гольца [12; 21; 28]:

$$\boldsymbol{d_G} = \frac{\boldsymbol{L}}{\sqrt{\boldsymbol{SP}}} \qquad (1.5)$$

де: $\boldsymbol{dG}$ – коефіцієнт Гольца;

$\boldsymbol{L}$ – довжина шляхів сполучення, км;

$\boldsymbol{S}$ – площа регіону, км^2;

$\boldsymbol{P}$ – кількість населених пунктів, одиниць. За допомогою зазначених показників можна отримати кількісну характеристику транспортної мережі і визначити рівень забезпеченості транспортними шляхами будь-якої території, а також вони дозволяють порівнювати як однорангові, так і різнорангові регіони між собою [12; 28].

Виклад основного матеріалу. Територія Запорізької області має відносно компактну конфігурацію, що нагадує широкий ромб. Її протяжність із півночі на південь складає 208 км, а зі сходу на захід – 235 км. Формуванню автомобільної транспортної системи Запорізькій області сприяє рівнинний рельєф. Середні висоти території коливаються від 0 до 200 м, найвища точка – г. Більмак-могила підіймається на 324 м. Північно-західна частина області розташована на Придніпровській височині, на сході підноситься Приазовська височина, центральну частину займає Придніпровська низовина, а південь знаходиться в межах Приазовської і Причорноморської низовин. Відносно середньо- і слаборозчле-

нований рельєф височин та пласкорівнинний низовин практично не створює перешкод для прокладання автомобільних доріг, що дозволяє будувати густу транспортну мережу потрібної конфігурації, пристосовуючись до наявної системи розселення [11].

На території області розташовано 950 населених пунктів, з яких 14 міських поселень і 936 населених пунктів сільського типу. Населення Запорізької області станом на 01.01.2022 р. складало 1 638,5 тис. осіб. Територія області поділяється на 5 адміністративних районів – Запорізький, Василівський, Пологівський, Мелітопольський і Бердянський, до складу яких входять 67 територіальних громад [2; 4; 31].

Загальна характеристика і регіональні відмінності автомобільної транспортної мережі Запорізької області. Природні і соціально-економічні умови Запорізької області сприяли формуванню розгалуженої автотранспортної мережі. Станом 01.01.2021 р. протяжність автомобільних доріг загального користування з твердим покриттям в Запорізькій області складала 6834,3 км, в тому числі доріг державного і місцевого значення (табл.1) [23; 24].

Загальна протяжність автомобільних доріг загального користування в Запорізькій області наближається до середньої по Україні, вона значно поступається Харківській, Вінницькій, Дніпропетровській, Львівській, Житомирській, Полтавській областям з показниками більш за 8-9 тис. км, але помітно перевищує Чернівецьку, Закарпатську, Івано-Франківську, Херсонську області, де показники коливаються в межах 2-4 тис. км [1].

Таблиця 1 / Table 1

Протяжність автомобільних доріг загального користування з твердим покриттям в Запорізькій області станом 01.01.2021 р. / Length of public roads with hard surface in Zaporizhzhia region as of 01.01.2021

Дороги державного значення	Протяжність (км)	Дороги місцевого значення	Протяжність (км)
Міжнародні дороги	400	Обласні дороги	2424,1
Національні дороги	418,7	Районні дороги	2766,9
Регіональні дороги	77,2		
Територіальні дороги	747,4		
Всього	**1 643,3**	**Всього**	**5 191**

(Складено за даними [23; 24])

Порівнюючи структуру автомобільних доріг області за значенням станом на 2021 р. з її структурою в 2019 р. можна побачити підвищення статусу багатьох з них. Якщо протяжність міжнародних доріг державного значення за цей період зросла лише на 7,2 км, то протяжність національних збільшилась на 315 км за рахунок переходу до цієї категорії доріг нижчих рангів. Про це свідчить стрімке скорочення протяжності доріг регіонального і територіального рангів – на 138,5 і 405,4 км відповідно [23; 24; 29].

Автотранспортну мережу Запорізької області складають дороги всіх п'яти категорій, але їхня протяжність дуже відрізняється одна від одної. Так, протяжність автошляхів I категорії дорівнює лише 56,2 км (0,8 % від загальної протяжності). Протяжність доріг II категорії помітно більше – 929,2 км (13,6 %), дороги III категорії лише трохи перевищують попередню категорію – 1054,2 км (15,4 %). При цьому найбільша протяжність припадає на дороги IV категорії – 4658,7 км (68,2 %). Найменш комфортні дороги V категорії мають протяжність лише 135,3 км (2%). Можна зазначити, що майже 2/3 автомобільних шляхів Запорізької області належать до малокомфортних за умовами пересування [23; 24].

Виходячи з зазначеної структури автодоріг області можна розрахувати середньозважений показник категорійності автомобільних шляхів (формула 1.3), який для Запорізької області дорівнює 3,57. Порівнюючи його з середнім по Україні (3,7) можна зазначити, що Запорізька область має дещо кращу категорійну структуру автодоріг, але взагалі переважають дороги нижче за третю категорію з низьким комфортом для пересування.

Територією Запорізької області проходять такі дороги державного значення [1]:

- міжнародна автомобільна дорога державного значення М-14 Одеса-Мелітополь-Новоазовськ, яка є частиною міжнародного транспортного коридору Чорноморської економічної співдружності;
- міжнародна автомобільна дорога державного значення М-18 Харків-Сімферополь, яка сполучає південь країни з північною і центральною частинами України;
- міжнародна автомобільна дорога державного значення М-14-03 обхід міста Мелітополь;
- національна автомобільна дорога державного значення Н-15 Запоріжжя-Донецьк, яка сполучає два економічно активні промислові регіони;

- регіональна автомобільна дорога Р-37 Енергодар-Василівка-Бердянськ, яка є частково евакуаційною на випадок аварії на Запорізькій АЕС та туристичним маршрутом до курортів Приазов'я – м. Бердянськ та м. Приморськ.

На жаль, переважна частина зазначених доріг державного значення відноситься до ІІ категорії, що має лише дві смуги для руху в обох напрямках. Це не лише знижує пропускну здатність, але і збільшує час пересування та навантаження на водіїв. Зазначені технічні умови не відповідають прийнятим в європейських країнах, де більшість транзитних автомагістралей мають розділову смугу і 2-4 смуги для руху у кожному напрямку, тобто відповідають вимогам доріг І категорії. Навіть дороги області, що були відремонтовані напередодні війни, мали добре сучасне покриття, але за технічними умовами залишалися дорогами ІІ категорії.

Щільність автодоріг загального користування в Запорізькій області становить 251 км/тис. км². За цим показником область дещо поступається середньому по Україні (285 км/тис. км²), а також іншим промислово розвиненим областям, наприклад Дніпропетровській (287 км/тис. км²), Харківській (303 км/тис. км²) областям.

Щільність автодоріг загального користування в Запорізькій області відносно кількості населення станом на 2021 р. складала 4,1 км/тис. жителів. Це досить високий показник, за ним область перевищувала Дніпропетровську і Харківську області, де він коливався в межах 3-3,6 км/тис. жителів. Однак головна причина полягає в тому, що Запорізька область відрізнялась від зазначених областей помітно меншою кількістю населення при достатньо значній площі.

Для узагальненої характеристики забезпеченості території транспортними шляхами і можливості її порівняння з іншими регіонами використовують відносні показники, такі як коефіцієнти Енгеля і Гольца. Ці коефіцієнти дозволяють отримати комплексну оцінку, що враховує співвідношення протяжності транспортних шляхів і площі території, кількості населення та кількості населених пунктів.

Коефіцієнт Енгеля характеризує транспортну забезпеченість регіону, враховуючи його площу і чисельність населення (формула 1.4). Для Запорізької області він складав 1,02. Його порівняння з іншими областями демонструє схожість, наприклад, коефіцієнт Енгеля в Кіровоградській області становить 1,16 [27], в Закарпатській – 1,0, в Чернівецькій – 1,2, в Івано-Франківській – 1,1, в Львівській – 1,3 [10]. Тобто можна побачити подібне співвідношення довжини автошляхів, площі і населення певних регіонів України. Дещо менший показник Запорізької області можна пояснити відносно великою чисельністю населення. Недоліком коефіцієнту Енгеля можна вважати його відносну нестабільність, що залежить від динаміки кількості населення регіону.

Коефіцієнт Гольца також надає комплексну оцінку транспортної забезпеченості регіону. Він є більш стабільним оскільки враховує протяжність транспортних шляхів, площу регіону і кількість населених пунктів. Його можна вважати найбільш репрезентативним тому, що дороги поєднують саме населені пункти між собою і саме розташування поселень визначає протяжність і конфігурацію транспортної мережі.

Коефіцієнт Гольца для Запорізької області складає 1,38, що корелює з аналогічними показниками інших областей. Наприклад, в Кіровоградській області він становить 1,13 [27], в Закарпатській – 1,4, в Чернівецькій – 1,8, в Івано-Франківській – 1,4, в Львівській – 1,5 [10]. Це також свідчить про відносну рівномірність автотранспортної забезпеченості за областями України.

Таким чином, попри розбіжність з іншими областями за певними показниками автотранспортної мережі, такими як протяжність автодоріг, їх щільність, категорійна структура, можна побачити, що за узагальненими коефіцієнтами Енгеля і Гольца Запорізька область схожа з багатьма областями України. Однією з головних проблем автотранспортної мережі області є низька категорійність автомобільних шляхів взагалі і дуже мала протяжність сучасних комфортних для пересування доріг І категорії.

Транспортні мережі нових адміністративних районів Запорізької області мають певні особливості і відмінності, що впливають на показники їхньої транспортної забезпеченості і доступності. Виявлення зазначених особливостей сприятиме визначенню ступеня раціональності утворення адміністративних районів.

За загальною протяжністю автомобільних доріг з твердим покриттям райони області помітно відрізнялись один від одного (табл. 2). Найбільша протяжність автошляхів спостерігалась в Пологівському (1678,4 км), Мелітопольському (1596,6 км) і Запорізькому (1424,7 км) районах, тоді як найменша характерна для Василівського (1049,9 км) і Бердянського (1083,7 км) районів. Тобто відмінності складають 1,4-1,6 разів.

Ще більші розбіжності спостерігались у розподілі по районах області автодоріг за категорією. Попри дуже малу протяжність в області доріг І категорії (56,2 км) майже всі вони знаходяться у Запорізькому районі (44,9 км), дуже незначні ділянки є ще в Бердянському (6,4 км) і Василівському (4,9 км) районах. При цьому в Мелітопольському і Пологівському районах доріг цієї категорії взагалі немає (рис. 1).

Таблиця 2 / Table 2

Категорії і протяжність автомобільних доріг Запорізької області станом на 01.01.2021 р. / Categories and length of highways of Zaporizhzhia region as of 01.01.2021

Райони	Усього км	У тому числі за категоріями (км)					Показник категорійності
		I	II	III	IV	V	
Бердянський	1083,7	6,4	241,8	127,5	703,1	5,9	3,43
Василівський	1049,9	4,9	141,5	313,1	547,1	43,3	3,45
Запорізький	1424,7	44,9	152	179,1	1097,6	7,4	3,73
Мелітопольський	1596,6	-	187,1	210,2	1173,2	26,1	3,64
Пологівський	1678,4	-	206,8	225	1194	52,6	3,65
Всього	**6834,3**	**56,2**	**929,2**	**1054,2**	**4658,7**	**135,3**	**3,57**

Складено за даними [23; 24]

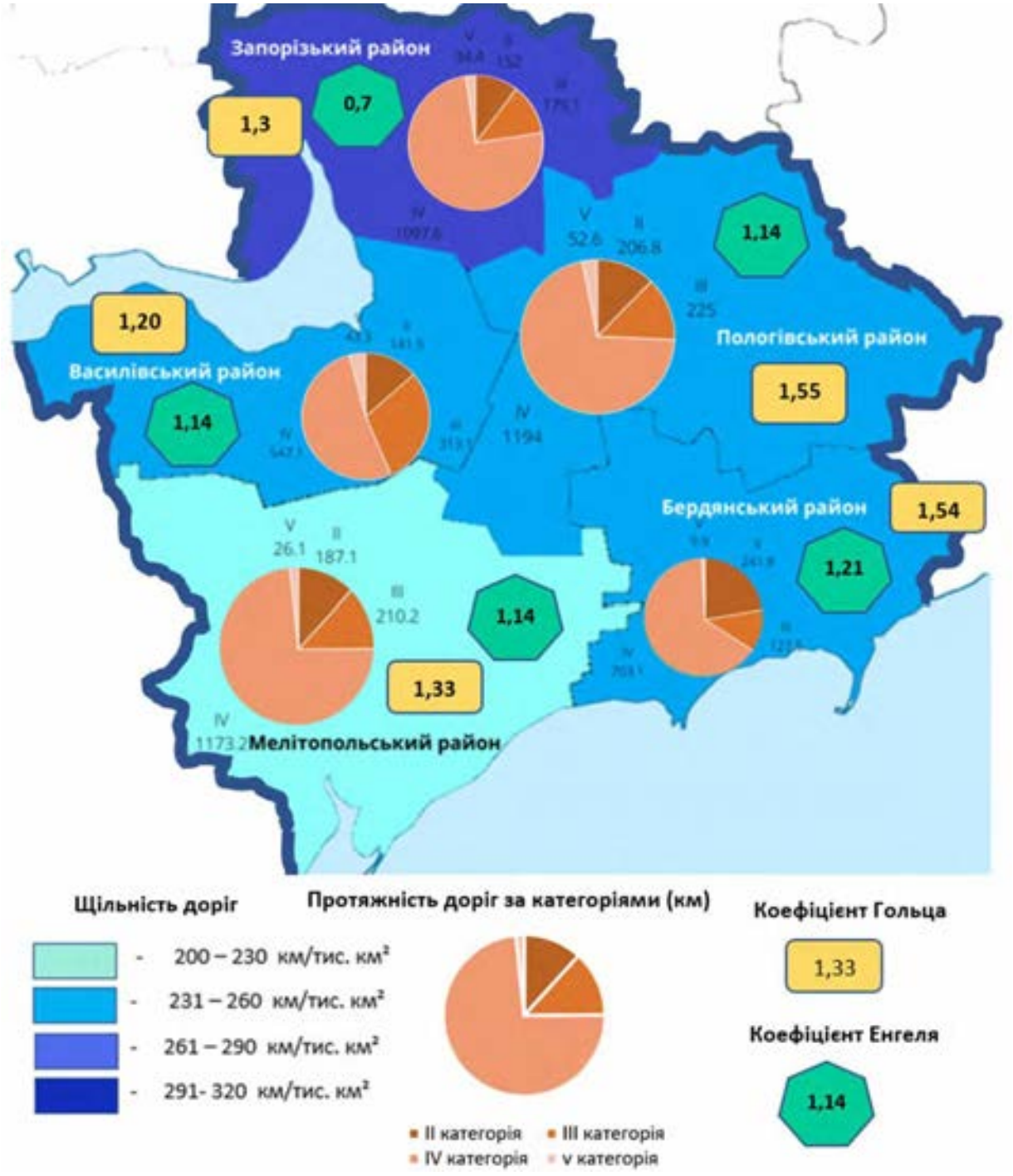


Рис. 1. Щільність і протяжність автомобільних доріг по районах Запорізької області станом на 01.01.2021 р. / Fig. 1. Density and length of roads by districts of Zaporizhzhia region as of 01.01.2021

Протяжність автодоріг ІІ категорії коливається від 141,5 км в Василівському районі до 241,8 км в Бердянському, різниця складає 1,7 рази. Дороги цієї категорії складають основну частину міжнародних і національних шляхів, а також тих, що з'єднують райцентри між собою і з обласним центром. Наприклад, до них відносяться ділянки міжнародної дороги М-14 Одеса-Мелітополь-Новоазовськ в Мелітопольському і Бердянському районах, більша частина ділянок міжнародної дороги М-18 Харків-Сімферополь в Запорізькому, Василівському і Мелітопольському районах.

Відмінності районів за протяжністю доріг ІІІ категорії ще більші і дорівнюють 2,5 рази від 127,5 км в Бердянському до 313,1 км в Василівському. Ці дороги в більшості випадків поєднують центри територіальних громад з райцентрами. При цьому, можна зазначити, що сумарна протяжність доріг ІІ та ІІІ категорій, які дещо схожі за комфортністю, не настільки велика, вона коливається від 331,1 км (Запорізький р-н) до 454,6 км (Василівський р-н), тобто відрізняється лише в 1,4 рази.

Найбільша протяжність в області припадає на автодороги IV категорії, вона коливається від 547,1 км (Василівський р-н) до 1194 км (Пологівський), відмінності складають 2,2 рази. Така різниця пояснюється тим, що вони з'єднують, здебільшого, сільські поселення між собою. Враховуючи, що найменша кількість сільських поселень припадає на Бердянський (109 поселень) і Василівський (99 поселень) райони, то і протяжність відповідних доріг IV категорії в них найменша (703,1 та 547,1 км відповідно). В той же час велика кількість таких поселень в Запорізькому (274), Мелітопольському (201) і Пологівському (231) районах обумовлює значну протяжність сільських доріг IV категорії (від 1097,6 до 1194 км).

Дороги V категорії в області мають дуже незначну протяжність, що пояснюється їх незручністю для використання з-за наявності лише однієї смуги руху, це виключає вільний роз'їзд автівок, що рухаються у зустрічних напрямках. Їх протяжність коливається від 5,9 км в Бердянському до 52,6 км в Пологівському районах.

Найкращі значення середньозваженого показника категорійності автомобільних шляхів в Запорізькій області мають Бердянський (3,43) і Василівський (3,45) райони (табл. 2). Таке положення пояснюється тим, що незважаючи на дуже малу протяжність тут доріг І категорії, в їх структурі помітну роль відіграють дороги ІІ та ІІІ категорій, які складають 43 % у Василівському і 34 % в Бердянському районі.

Найгірші значення середньозваженого показника категорійності автодоріг спостерігаються в Запорізькому (3,73), Пологівському (3,65) і Мелітопольському (3,64) районах (табл. 2). Це пов'язано з переважанням в їх структурі доріг IV категорії, при цьому автодороги ІІ та ІІІ (а для Запорізького району і І) категорій складають лише 26 % для Запорізького, 25 % для Мелітопольського і 26 % для Пологівського районів.

Щільність автодоріг загального користування в районах Запорізької області коливається в досить значних межах – від 229 км/тис. км² в Мелітопольському районі до 310 км/тис. км² в Запорізькому, тобто відрізняється в 1,4 рази (табл. 3). При цьому, інші райони дуже схожі за цим показником, що дорівнює 239-248 км/тис. км². Значна щільність автодоріг Запорізького району пояснюється наявністю тут великої кількості населених пунктів (283), що в 1,2-2,5 рази перевищує інші райони, і значною їх густотою (58 пос./тис. км^2), що у 1,7-2,4 рази більше за інші райони області.

Таблиця 3 / Table 3

Основні показники транспортної забезпеченості Запорізької області станом на 01.01.2021 р. / Main indicators of transport security in Zaporizhzhia region as of 01.01.2021

Райони	ds щільність доріг, км/тис. км²	dh щільність доріг за населенням, км/тис. осіб	dE коефіцієнт Енгеля	dG коефіцієнт Гольца	Середні відстані до райцентрів, км
Бердянський	243	5,9	1,21	1,54	40,3
Василівський	239	5,7	1,20	1,60	47,2
Запорізький	310	1,7	0,7	1,30	35,8
Мелітопольський	229	5,6	1,14	1,33	32
Пологівський	248	10	1,55	1,32	40,6
Всього	251	4,10	1,02	1,38	39

(Складено за власними розрахунками)

За показником щільності автодоріг з урахуванням кількості населення райони області відрізнялись ще більше. При цьому, найвищій показник спостерігався в Пологівському районі (10

км/тис. осіб), а найменший – в Запорізькому (1,7 км/тис. осіб), відмінності сягали майже у 6 разів. Це пояснюється дуже великою кількістю населення в Запорізькому районі за рахунок розташування тут обласного центру. Найвищій результат в Пологівському районі пов'язаний з найменшою чисельністю населення в області, однією з найбільших площ (друге місце в області) і, відповідно, найбільшою протяжністю автодоріг.

Щільність автодоріг з урахуванням кількості населення в Мелітопольському, Василівському і Бердянському районах складала 5,6-5,9 км/тис. осіб, тобто майже не відрізнялась. Це пояснюється подібною пропорційною структурою між кількістю населення і площею, а також схожістю показників щільності населення (39,7-43 осіб/км^2) і густоти поселень (24,6-29,7 пос./тис. км^2).

Раціональність транспортної мережі регіону характеризує доступність його адміністративного центру, що може виражатись відповідною відстанню. Відстань до адміністративного центру залежить від його розташування на території, площі і конфігурації регіону та транспортної мережі. Райони області відрізняються значною диференціацією за цим показником. При цьому, середні показники відстані до райцентрів від центрів територіальних громад в Запорізькій області складають 39 км. Але відмінності між районами коливаються в межах 32-47,2 км. Найменші показники середньої відстані до райцентрів характерні для Мелітопольського (32 км) і Запорізького (35,8 км) районів, де райцентри мають зручне розташування у центрі компактної за конфігурацією території. Найбільші середні відстані мають Василівський (47,2 км) і Бердянський (40,3 км) райони, де райцентри розташовано на периферії, та Пологівський (40,6 км) район з його витягнутою конфігурацією.

Для узагальненої характеристики і порівняльної оцінки транспортної забезпеченості регіону використовується коефіцієнт Енгеля (формула 1.4), що враховує як площу території так, і чисельність населення. За цим коефіцієнтом спостерігається значна диференціація районів області. Найбільші його значення характерні для Пологівського району (1,55), а найменші – для Запорізького (0,7). Як зазначалось, такий дисбаланс пов'язаний з полярною, дуже великою різницею у кількості населення. Різниця між іншими районами незначна – їх показники коливаються в межах 1,14-1,21, що пояснюється відносно пропорційним співвідношенням протяжності автодоріг, площі території і чисельності населення. Враховуючи особливості рівня урбанізації в районах області, їх розподіл за коефіцієнтом Енгеля можна вважати відносно раціональним.

Більш репрезентативний результат для узагальненої характеристики транспортної забезпеченості регіону надає коефіцієнт Гольца (формула 1,5), що враховує площу території і кількість населених пунктів. Також він порівняно з коефіцієнтом Енгеля значно більш стабільний у часі. Дещо підвищеними значеннями коефіцієнту Гольца відрізняються Бердянський (1,54) і Василівський (1,6) райони, що пояснюється замалою (у 2 рази меншою, ніж в інших районах) кількістю населених пунктів і дещо меншою їх густотою. Тобто для існуючих поселень протяжність автодоріг краща ніж в інших районах, де цей коефіцієнт складає 1,3-1,33, тобто майже не відрізняється. Незначні коливання показників коефіцієнта Гольца між районами свідчать про достатньо раціональний адміністративно-територіальний устрій області.

Оцінка часової доступності районних автотранспортних мереж Запорізької області. Оцінка часової доступності автотранспортних мереж Запорізької області та її адміністративних районів проводилась на рівні доступності адміністративних центрів території, які здебільшого виконують не лише управлінські функції, але і забезпечують задоволення певних потреб населення в освітніх, медичних, культурних, побутових та інших послугах. При цьому, за початкову точку розрахунків в адміністративних центрах прийнято місце розташування автостанцій і автовокзалів. Така точка відліку пояснюється наступним чином: по-перше, певна частина населення користується суспільним автотранспортом, по-друге, автовокзали і автостанції розташовані у центральній частині відповідних населених пунктів.

Часова автотранспортна доступність адміністративних центрів залежить від їх розташування, конфігурації автотранспортної мережі, площі території, категорії відповідних доріг і стану та якості їх покриття. Враховуючи те, що переважну частину в області складають дороги II-IV категорії з обмеженням швидкості до 90 км/год і наявність на них лише двох смуг для руху в обох напрямках, середня швидкість поза межами населених пунктів, звичайно у таких розрахунках, приймається в 60 км/год.

Доступність обласного центру Запорізької області визначається певними факторами. По-перше, розташуванням м. Запоріжжя на північно-західній периферії області, що обумовлює значну відстань до населених пунктів її південної частини. По-друге, у конфігурації обласної автотранспортної мережі визначаються дві автодороги II категорії, що з'єднують Запоріжжя з райцентрами області. Одна з них спрямована на південь і поєднує обласний центр з м. Василівка

і м. Мелітополь, інша – має південно-східний напрямок і з'єднує його з м. Пологи і м. Бердянськ. Тобто наявність двох, радіально розбіжних шляхів забезпечує кращу доступність обласного центру, цьому також сприяють автодороги, що поєднують між собою Мелітополь і Бердянськ та Бердянськ і Василівку, внаслідок чого утворюється циклічний, майже трикутний каркас обласної автотранспортної мережі з діагональним (Бердянськ – Василівка) її перетинанням.

Аналіз карти ізохрон Запорізької області дозволяє встановити, що 30-хвилинну доступність до Запоріжжя має лише досить обмежена територія навколо міста. Це пов'язано з великою площею м. Запоріжжя, що викликає необхідність тривалого руху міськими вулицями зі значним автотранспортним потоком і наявністю перехресть зі світлофорами. 60-ті хвилинну доступність має більша частина Запорізького та частини Василівського і Пологівського районів, сюди же потрапляє і райцентр м. Василівка.

Помітно більша, 90-хвилинна доступність характерна для східної частини Запорізького, південної і західної частини Василівського, заходу Пологівського, північної і центральної частин Мелітопольського районів. До цієї зони також потрапляють райцентри м. Пологи і м. Мелітополь. Значна частина області має двогодинну доступність до Запоріжжя, до неї відноситься західна частина Василівського, західна і східна частини Мелітопольського, східна частина Пологівського та північно-західна частина Бердянського районів. Крайній південь області має навіть більшу за двогодинну доступність. До речі, в цю зону потрапляє райцентр м. Бердянськ.

Враховуючи конфігурацію території області і розташування м. Запоріжжя, наявний каркас обласної автотранспортної мережі можна вважати оптимальним, що забезпечує відносно рівномірне зростання часової доступності при віддаленні від обласного центру. Однак значна віддаленість південної частини області і, відповідно, її велика часова відстань викликають питання про прискорений розвиток Мелітополя і Бердянська як субрегіональних центрів для задоволення потреб не лише населення відповідних районів, але і суміжних з ними частин Василівського і Пологівського районів. Виходячи з майже трикутної конфігурації каркасу автотранспортної мережі області, такий розподіл центрів можна вважати достатньо раціональним.

Мелітопольський район є найбільшим за площею в області, але м. Мелітополь розташований в центральній частині, автотранспортна мережа має радіальну, навіть з елементами радіально-кільцевої конфігурацію, що забезпечує відносно зручний доступ до нього зі всієї території. Центри територіальних громад від Мелітополя розташовані на відстані від 7 до 66 км або від 16 до 64 хв. Однак інші поселення мають більший розбіг доступності. Завдяки наявності чотирьох доріг II категорії і п'яти доріг III категорії, що радіально розходяться від райцентру, розподіл зон часової доступності виявляється майже рівномірний. Більша частина району знаходиться в зоні годинної доступності і лише північний захід з Чкалівською і частиною Веселівської громад, а також невеликі ділянки південної і південно-західної периферії мають більшу за годинну доступність (рис. 2) [5].

Пологівський район займає друге за площею місце в області. Тут, як і в Мелітопольському районі, райцентр знаходиться в центральній частині території, а автотранспортна мережа має радіально-вузлову конфігурацію. Такими вузлами з власними радіальними автошляхами є, окрім райцентру, невеликі міста Оріхів, Токмак, Гуляйполе. Від м. Пологи розходяться п'ять автодоріг у північному, західному, східному, південному і південно-західному напрямках. Центри територіальних громад від м. Пологи розташовані на відстані від 10 до 65 км або від 14 до 72 хв. Значна частина району знаходиться в зоні годинної доступності, більшу мають розташовані на південному заході Молочанська і частина Токмацької громад (рис. 3).

Запорізький, Бердянський і Василівський райони схожі між собою за площею, а також розташуванням райцентрів на периферії території. Внаслідок цього в них відстані від центрів територіальних громад до райцентрів не лише не менші, але й іноді перевищують аналогічні Мелітопольського або Пологівського районів, площі яких майже у півтори рази більші за них. Так, у Запорізькому районі такі відстані коливаються в межах 22-82 хв., в Василівському –18-70 хв., в Бердянському –25-76 хв.

Достатньо своєрідними у зазначених районах є каркаси автотранспортних мереж. В Запорізькому районі автотранспортна мережа, не зважаючи на периферійне положення райцентру, має радіальний вигляд з сімома розбіжними автошляхами в усіх напрямках. При цьому, автошляхи північного спрямування – напрямок на м. Дніпро і ділянки напрямку на м. Харків відносяться до доріг I категорії. Дороги радіальних напрямків на території району з'єднуються між собою автошляхами переважно IV категорії, які здебільшого знаходяться у незадовільному стані, тому говорити про повноцінну радіально-кільцеву структуру автотранспортної мережі, нажаль, неможливо. Крім того, цьому заважає р. Дніпро, що відокремлює західну частину району, а автомобільні мости є лише у Запоріжжі (рис. 4).

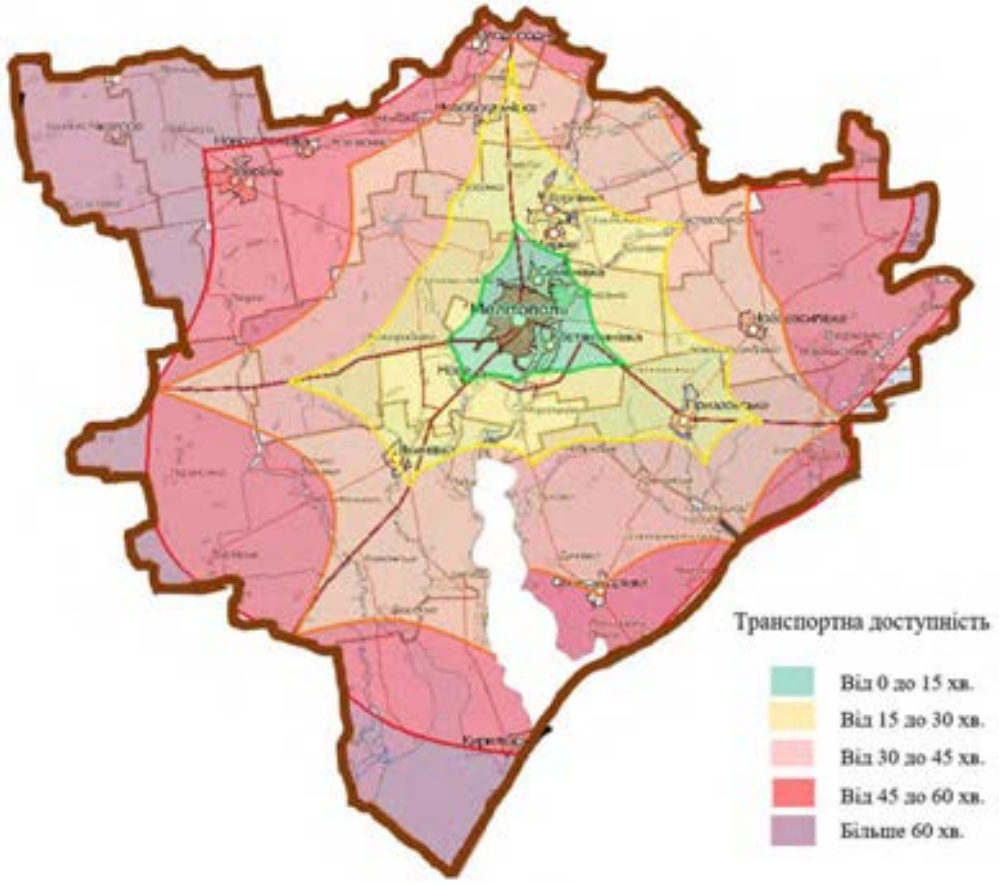


Рис. 2. Часова доступність території Мелітопольського району до районного центру /
Fig. 2. Temporal accessibility of the territory of Melitopol district to the administrative center

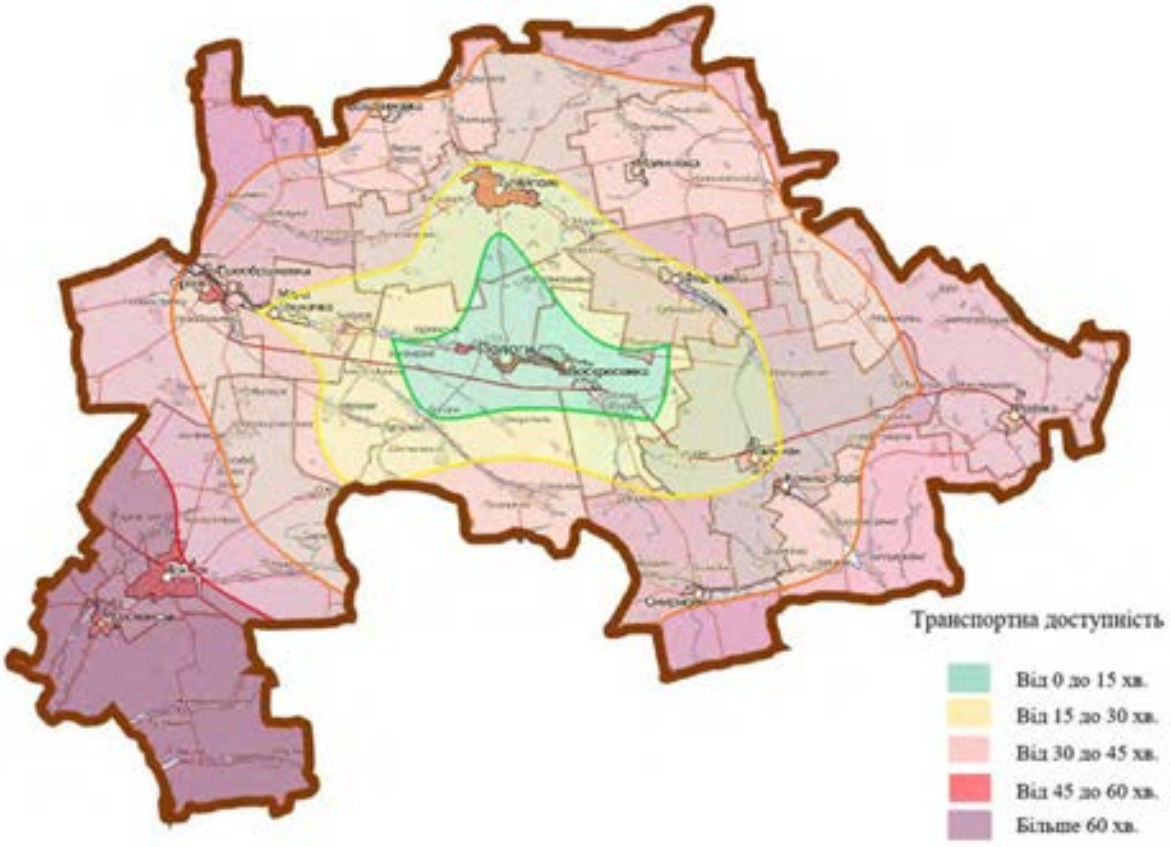


Рис. 3. Часова доступність території Пологівського району до районного центру /
Fig. 3. Temporal accessibility of the territory of Polohy district to the administrative center

У Василівському районі від райцентру автодороги розходяться у шістьох напрямках, виключення складає північно-західний напрямок, де протікає річка Дніпро. Цікаво, що тут більшість центрів територіальних громад (за виключенням лише Степногірська) розташовані приблизно двома паралельними смугами, які протяглись у широтному напрямку. Їх поєднання створює циклічний прямокутний каркас автотранспортної мережі з двома невеликими відхиленнями до Степногірська на півночі та до Водяного і Кам'янки-Дніпровської на заході (рис. 5).

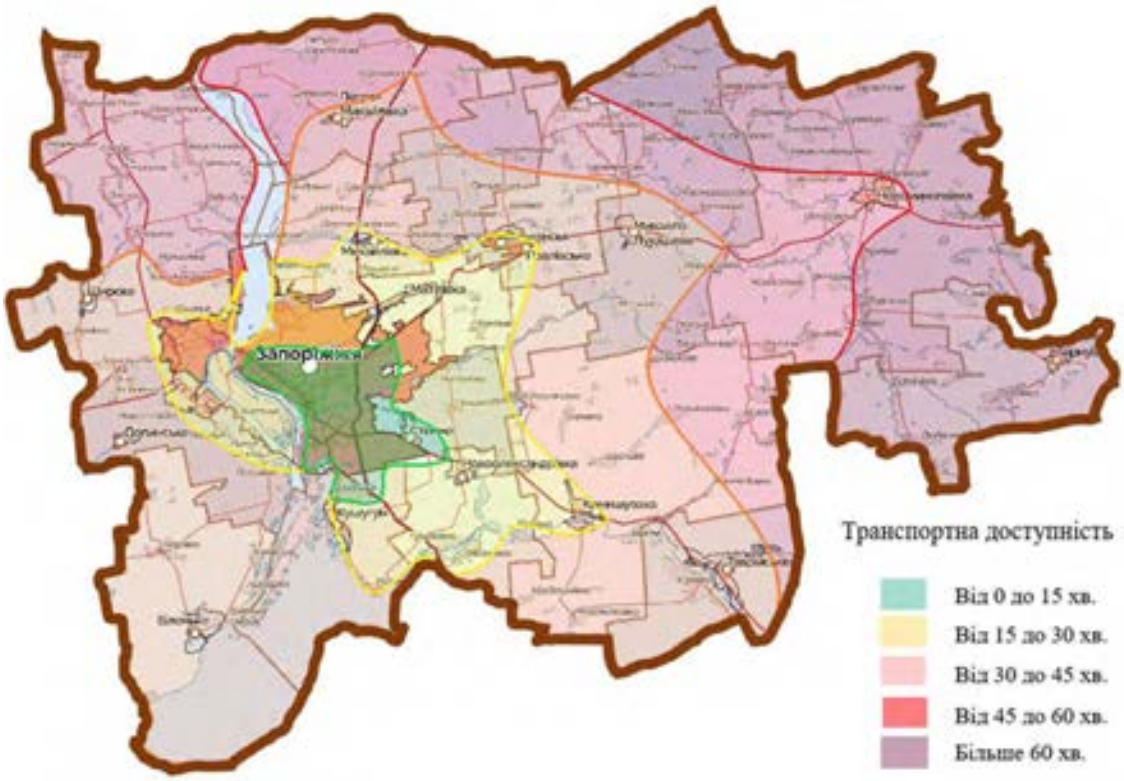


Рис. 4. Часова доступність території Запорізького району до районного центру /
Fig. 4. Temporal accessibility of the territory of Zaporizhzhia district to the administrative center

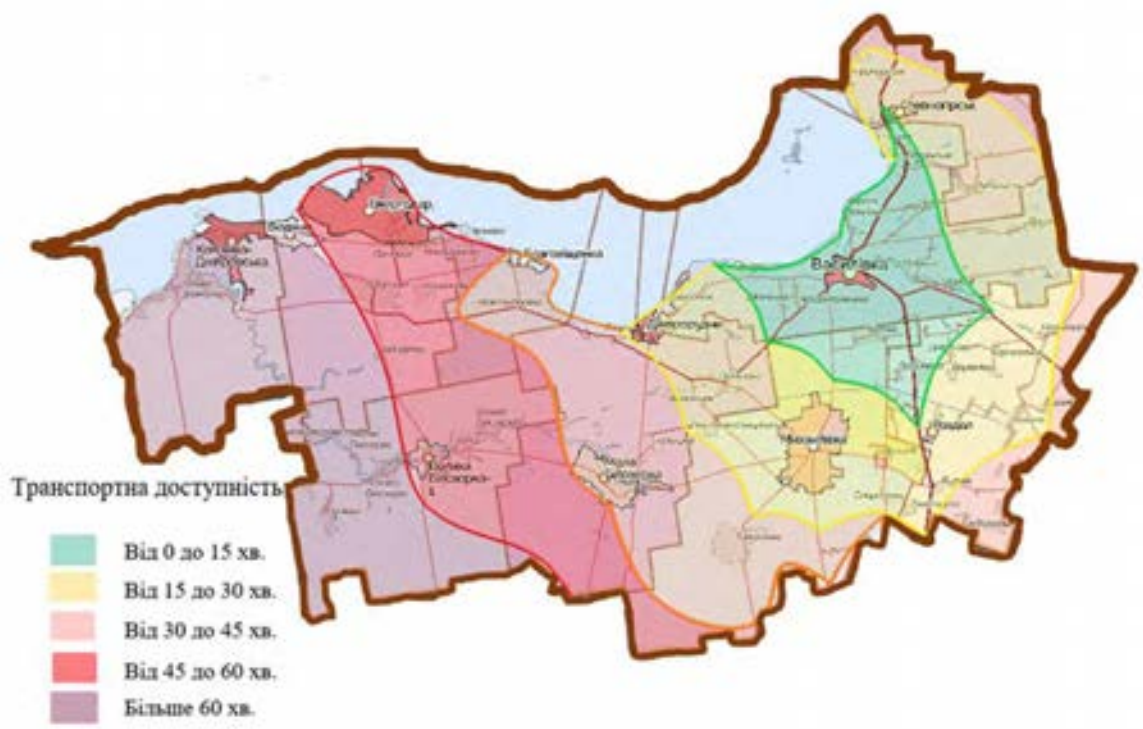


Рис. 5. Часова доступність території Василівського району до районного центру /
Fig. 5. Temporal accessibility of the territory of Vasylivka district to the administrative center

В Бердянському районі від райцентру відходять автошляхи у п'ятьох напрямках, за виключенням південних через розташування там Азовського моря. Радіальні напрямки з'єднуються між собою автошляхами переважно IV категорії і не завжди задовільного стану, однак враховуючи їх відносно незначну протяжність і розташування на них поселень, можна вважати, що автотранспортна мережа району має ознаки радіально-кільцевої конфігурації. Крім того, частина цієї мережі, що простягнулась від Бердянська у північно-західному напрямку, має ознаки циклічної (рис. 6).

Завдяки зазначеним особливостям більша частина Запорізького, Василівського і Бердянського районів знаходяться в зоні годинної доступності до райцентрів. Більша за годинну доступність характерна для тих периферійних частин

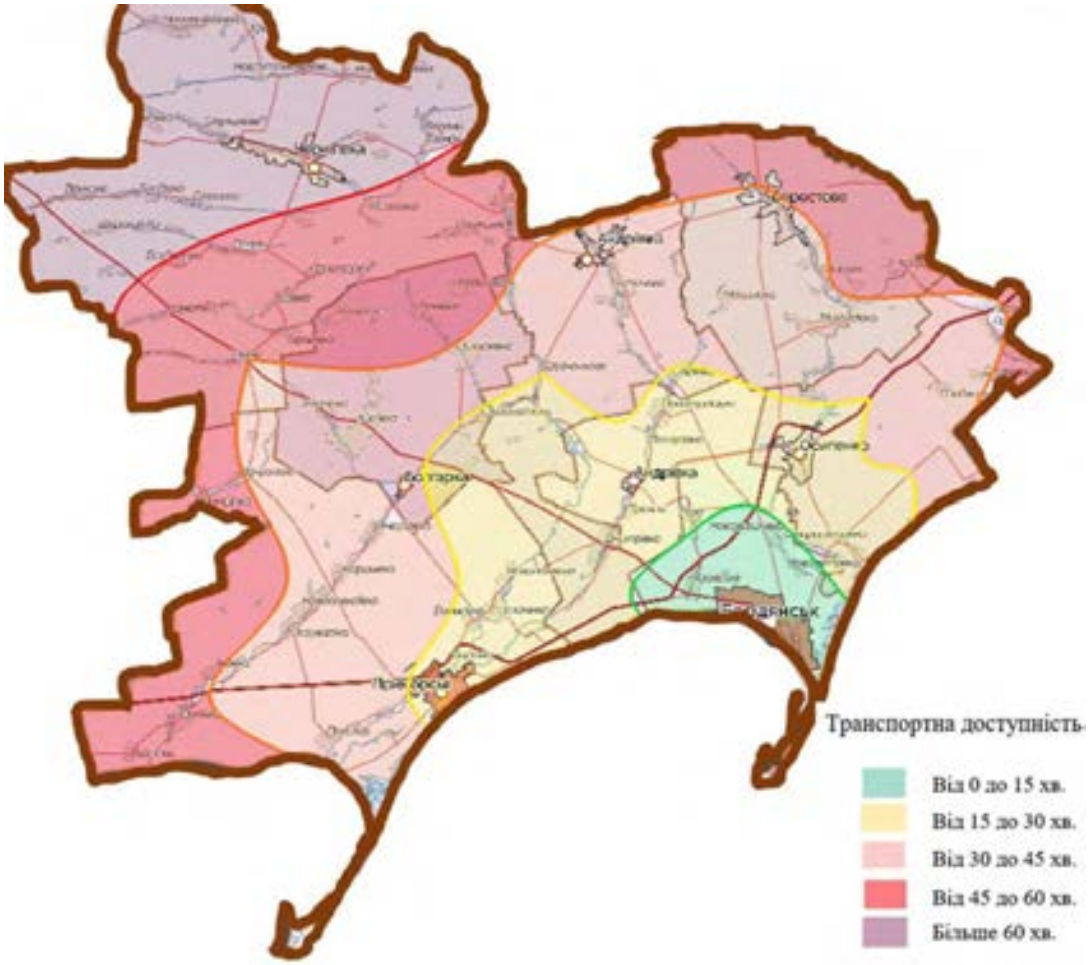


Рис. 6. Часова доступність території Бердянського району до районного центру /
Fig. 6. Temporal accessibility of the territory of Berdiansk district to the administrative center

районів, що знаходяться у протилежному від райцентру боці території. Так, в Запорізькому районі до них належить схід території з Тернуватською і частинами Новомиколаївської та Михайло-Лукашевської територіальних громад.

У Василівському районі більша частина території знаходиться в зоні 45-хвилинної доступності, і лише його захід має годинну і більшу доступність. Зокрема, більша за годинну доступність спостерігається в Кам'янко-Дніпровській та частинах Водянської і Великої Білозерської громад. В Бердянському районі більшу за годинну доступність до райцентру мають Чернігівська та частина Коларівської територіальних громад.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Можна зазначити, що районні автотранспортні мережі Запорізької області станом на 2021 р. відрізнялись значною диференціацією за протяжністю автошляхів, їх категорійністю, щільністю у відношенні до площі та за коефіцієнтом Енгеля. Ще більша полярність спостерігалась у показниках щільності автодоріг з урахуванням чисельності населення. При цьому, за такими узагальненими показниками як середньозважений показник категорійності автодоріг та коефіцієнт Гольца для районів області характерна схожість, що свідчить про достатньо раціональний розподіл території за районами.

Виходячи з компактної, ромбоподібної конфігурації території області і розташування м. Запоріжжя в її північній частині, наявний каркас обласної автотранспортної мережі можна вважа-

ти оптимальним. Він забезпечує відносно рівномірні зміни часової доступності при віддаленні від обласного центру. Однак значна віддаленість південної частини області і, відповідно, її гірша часова доступність до обласного центру викликають питання про розвиток Мелітополя і Бердянська як субрегіональних центрів.

Адміністративні райони Запорізької області мають своєрідні каркаси автранспортних мереж, що впливає на доступність території. В Запорізькому і Мелітопольському районах вони мають радіальну конфігурацію з елементами радіально-кільцевої, в Пологівському – радіально-вузлову, в Бердянському – радіальну з елементами циклічності, в Василівському – циклічну конфігурацію. Враховуючи конфігурацію території районів і наявну систему розселення в них, ці каркаси можна вважати наближеними до оптимальних.

Таким чином, попри розбіжність у площі території, кількості населених пунктів, розташуванні райцентрів, протяжності автошляхів, всі райони області мають досить схожу часову доступність до райцентрів, яка лише для окремих периферійних громад дещо перевищує одногодинну. Це свідчить про достатньо раціональний поділ області на адміністративні райони.

Перспективи подальших досліджень передбачають наукове обґрунтування напрямків розвитку автотранспортної мережі Запорізької області та її адміністративних районів з врахуванням попередніх особливостей і проблем після закінчення повномасштабної російської агресії і деокупації цієї території.

Список використаних джерел

1. *Автомобільні шляхи України.* https://goo.su/9uBR
2. *Атлас адміністративно-територіального устрою України (2021). Видання друге, доповнене. Київ.*
3. *Байтеряков, О.З., & Воронова, В.В. (2020). Топологічний аналіз автомобільної транспортної доступності території Запорізької області. Актуальні наукові дослідження в сучасному світі, 12(68). 4, Переяслав. 6-11.*
4. *Байтеряков, О., Арсененко, І., & Донченко, Л. (2022). Просторовий аналіз системи розселення Запорізької області. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (57), 48-67.* https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-05
5. *Байтеряков, О.З. (2023). Оцінка часової доступності автотранспортної мережі Мелітопольського району станом на 01.01.2022 р. Інтеграція українських наукових досліджень в міжнародний простір: регіональний аспект: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю, присвяченої 100-річчю Мелітопольського державного педагогічного університету імені Богдана Хмельницького (с. 15-17). 21 квітня 2023 р. Запоріжжя: ФОП Однорог Т.В.*
6. *Байтеряков, О., & Воронова, В. (2024). Топологічний аналіз мережі автомобільного транспорту Запорізької області. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (60), 137-158.* https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-10
7. *Бондар, Н.М. (2014). Розвиток транспортної інфраструктури України на засадах державо-приватного партнерства: монографія. К.: НТУ.*
8. *Гащук, П.М., & Тимошенко, С.Ю. (2020). Означуваність і зміст поняття транспортної системи. Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності, (22), 66-77.* https://doi.org/10.32447/20784643.22.2020.09
9. *Грицевич, В.С., & Сеньків, М.І. (2014). Топологія і метрика автотранспортного простору як чинник транспортно-логістичної діяльності в Західному регіоні України. Геополитика и экогеодинамика регионов, 10 (2), 483-488.*
10. *Гудима, Р.Р. (2013). Оцінка базового рівня транспортної забезпеченості прикордонного регіону. Соціально-економічні проблеми сучасного періоду України. Механізми взаємодії суб'єктів економічних відносин у транскордонному просторі, 4 (102), 75-83.*
11. *Запорізька область: Фізична географія Запорізької області (2014). Хрестоматія. Мелітополь: Вид-во МДПУ імені Богдана Хмельницького.*
12. *Загальний курс транспорту (2006). К.: Вища освіта.*
13. *Загурський, О.М. (2018). Транспортна доступність сільських територій: методологічні підходи. Автомобільний транспорт. (43). 65-70.* https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2018.43.0.65
14. *Кудряшов, А.В., & Мазуренко, О.О. (2021). Аналіз існуючої маршрутної мережі міста Марганець. Транспортні системи та технології перевезень. Збірник наукових праць ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна, (21), 16-22.* https://doi.org/10.15802/tstt2021/237634
15. *Мезенцев, К.В. (2005). Суспільно-географічне прогнозування регіонального розвитку: Монографія. Київ: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет».*
16. *Мельнійчук, М.М., & Ковальчук, С.І. (2012). Автомобільна транспортна доступність основних рекреаційних населених пунктів північно-західного регіону України. Природа Західного Полісся та прилеглих територій: збірник наукових праць. Луцьк: Волинський національний університет ім. Лесі Українки, (9), 106-119.*
17. *Науменко, А.П., & Макаревич, Д.О. Розвиток міжнародних автомобільних перевезень в рамках транспортних коридорів Європи та України.* https://jrnl.nau.edu.ua/index.php/PPEI/article/view/468/456

18. Неліпа, К.Г. (2019). Трансформація системи розселення Запорізької області (суспільно-географічне дослідження) [автореф. дис. канд. геогр. наук, Київський національний університет імені Тараса Шевченка]. Київ.
19. Нестеренко, Г.І., Музикін, М.І., Бібік, С.І., & Швайко, А.Ю. (2023). Аналіз транспортних мереж та організації автомобільних перевезень в країнах Європи. Системи та технології, 63(1), 88–99. https://doi.org/10.32782/2521-6643-2022.1-63.7
20. Пилипенко, І.О. (2010). Оцінка зміни периферійності адміністративних одиниць на прикладі Херсонської області. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченко. Серія: Географія, (57), 31-33. https://scholar.google.com.ua/citations?view_op=view_citation&hl=uk&user=sVNLaD0AAAAJ&citation_for_view=sVNLaD0AAAAJ:edDO8Oi4QzsC
21. Підгрушний, Г.П., Нагірна, В.П., & Фащевський, М.І. (2012). Інтегральний потенціал території – теоретичні та практичні аспекти дослідження: монографія. Київ: Інститут географії НАН України. https://igu.org.ua/sites/default/files/igu-files/mono/ipt.pdf
22. Плекан, У.М., Ляшук, О.Л., Рожко, Н.Я., & Цьонь, О.П. (2022). Удосконалення соціальної функції транспортної галузі України. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки, 1(6(37)), 157-166. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6(37).1.157-166
23. Про надання інформації щодо довжини автомобільних шляхів по нових районах Запорізької області від 25.10.2021, №79-Б-277-е. (2021). Запорізька обласна державна адміністрація.
24. Про надання інформації від 22.10.2021, №10/2862 (2021). Служба автомобільних доріг у Запорізькій області.
25. Пугач, С.О., & Новосад С.В. (2015). Трактування понять «транспортна доступність» та «стиснення простору» у сучасній науковій літературі. Актуальні проблеми країнознавчої науки: матеріали ІІІ Міжнар. наук. практ. інтернет-конференції (с. 28-31). 15–16 грудня 2015 р. Луцьк: Вежа-Друк.
26. Родащук, Г.Ю. (2014). Визначення рівня розвитку транспортної інфраструктури сільських територій. Збірник наукових праць Уманського національного університету садівництва, 86(2), 81-90.
27. Сільченко, Ю.Ю., Семенюк, Л.Л., & Зарубіна, А.В. (2017). Аналіз впливу транспортної доступності на соціально-економічний розвиток Кіровоградської області. Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія: Географічні науки, (7), 81-87.
28. Соловйова, О.О., Висоцька, І.І., & Герасименко, І.М. (2019). Загальний курс транспорту. Київ: НАУ.
29. Стан та розвиток транспорту області. (2019). Статистичний збірник. ДЕРЖСТАТ. Головне управління статистики у Запорізькій області. Запоріжжя.
30. Фатюха, Н.Г. (2016). Статистична оцінка розвитку автомобільного транспорту Запорізької області. Ефективна економіка, (4), http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=4885
31. Численність наявного населення України на 1 січня 2022 року. (2022). Статистичний збірник. Київ: Державна служба статистики України.
32. Borsuk, Y. (2024). Topological analysis of roadway and railway networks of the Ukrainian-Polish borderlands (on the example of Lviv Oblast and Subcarpathian Voivodeship). Journal of Geology, Geography and Geoecology, 33(1), 44-53. https://doi.org/https://doi.org/10.15421/112405
33. Hla, S.S. (2019). A geographical analysis on transportation system in Pakokku district. IJCIRAS (International Journal of Creative and Innovative Research in All Studies), 2(4), 3-13. http://www.ijciras.com/PublishedPaper/IJCIRAS1369.pdf
34. Jakimavičius, M., & Burinskienė, M. (2007). Automobile transport system analysis and ranking in Lithuanian administrative regions. Transport. 2007, XXII(3), 214–220.
35. Kutadinata, R., Dey, S., & Leow, D. (2021). Relative Mobility Analysis of a Public Transport Network in Comparison with Car Travel. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2675(11), 214-225. https://doi.org/10.1177/03611981211054822
36. Nesterenko, H.I., Muzykin, M.I., Strelko, O.H., Bibik, S.I., & Aleksieieva, A.O. (2023). Analysis of possibilities for integrating the transport system of Ukraine into the European transport network. Systems and Technologies, 66(2), 97-107. https://doi.org/10.32782/2521-6643-2023.2-66.11
37. Rodrigue J.P. (2024). The Geography of Transport Systems. New York: Routledge. 402. https://doi.org/10.4324/9781003343196
38. Roy, A., Fuller, D., Nelson, T., & Kedron, P. (2022). Assessing the role of geographic context in transportation mode detection from GPS data. Journal of Transport Geography, (100), https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2022.103330
39. Sajous, P., Salze, P., & Bailly-Hascoët, V. (2020). The automobile system and transport models: developments for future mobility planning. The death and life of automobile mobility Flux 2020/1, (119-120), 173-184. https://shs.cairn.info/journal-flux-2020-1-page-173?lang=en
40. Zhang, H., Liu, Y., Shi, B., Jia, J., Wang, W., & Zhao, X. (2021). Analysis of Spatial-Temporal Characteristics of Operations in Public Transport Networks Based on Multisource Data. Journal of Advanced Transportation, 2021(1), https://doi.org/10.1155/2021/6937228

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу
Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Geographical analysis of the automobile transport network of Zaporizhzhia region

Oleg Baiteriakov [1]
PhD (Geography), Associate Professor of the Department of Geography and Tourism,
[1] Bohdan Khmelnitsky Melitopol State Pedagogical University, Zaporizhzhia, Ukraine;
Denys Kopylov [2]
Student, [2] National University of Kyiv-Mohyla Academy, Kyiv, Ukraine

ABSTRACT

Formulation of the problem. The need to study the pre-war state of the transport industry in the temporarily occupied territories is explained by the need to integrate it into the general transport network in the post-war period, considering the previous problems.

The purpose of the article is to identify the state and spatial differences in the level of availability of the automobile transport network in the territory of Zaporizhzhia region on the eve of a full-scale russian invasion.

Methods. The study used methods that allow obtaining a quantitative characteristic of the transport network coverage of the territory and comparing individual districts with each other. The indicators of road density by area, road density by population, weighted average road category index, and generalized Engel and Goltz coefficients have been calculated.

Results. The analysis shows that the road networks of the administrative districts of Zaporizhzhia region as of 2021 were significantly differentiated in terms of the length of roads, their category, and density in relation to the area, according to the Engel coefficient. Even greater polarity was observed in the density of roads per population. At the same time, according to such generalized indicators as the weighted average category indicator of roads and the Goltz coefficient, the districts of the region are characterized by similarity, which indicates a fairly rational distribution of the territory by districts. A comparative analysis of the frames of motor transport networks was conducted; their impact on the temporal motor transport accessibility of the administrative districts of the region was identified using the calculated and constructed isochrone maps. The areas of the region have unique road transport network frameworks that affect the accessibility of the territory. In Zaporizhzhia and Melitopol regions, they have a radial configuration with the elements of a radial-ring configuration, in Polohy - a radial-nodal configuration, in Berdiansk - a radial configuration with the elements of cyclicity, and in Vasylivka - a cyclic configuration. Comparing the configuration of the territory of the districts and the corresponding settlement systems makes it possible to consider the frameworks of district road networks as close to the optimal. Considering the configuration of the region's territory and the location of the city of Zaporizhzhia, the framework of the regional road network can be considered optimal; it provides a relatively uniform increase in time accessibility with distance from the regional center. However, the significant remoteness of the southern part of the region and, accordingly, its excessive temporal accessibility raise questions on the accelerated development of Melitopol and Berdiansk in the post-war period as subregional centers.

Scientific novelty and practical significance. The state and spatial differences in the level of availability of the automobile transport network in the territory of Zaporizhzhia region and its administrative districts on the eve of full-scale russian aggression have been identified.

The obtained data can be used for scientific substantiation of the development of the road transport network of Zaporizhzhia region and its administrative districts, considering the previous features and problems after the end of the full-scale russian aggression and de-occupation of this territory.

Keywords*: road transport network, road category, road transport accessibility, isochrones, administrative district, road network density, Engel coefficient, Goltz coefficient, time accessibility.*

References

1. *Roads of Ukraine. https://goo.su/9uBR [in Ukrainian]*
2. *Atlas of administrative-territorial organization of Ukraine. (2021). Second edition, supplemented. Kyiv, Ukraine. [in Ukrainian]*
3. *Baiteriakov, O.Z., & Voronova, V.V. (2020). Topological analysis of road transport accessibility of the territory of Zaporizhia region. Current scientific research in the modern world. International science journal, 12(68)4, 6-11. [in Ukrainian]*
4. *Baiteriakov, O., Arsenenko, I., & Donchenko, L. (2022). Spatial analysis of the settlement system of Zaporizhia region. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology", (57), 48-67. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-05 [in Ukrainian]*
5. *Baiteriakov, O.Z. (2023). Assessment of the temporal availability of the road network of Melitopol district as of 01.01.2022. Materials of the All-Ukrainian scientific and practical conference with international participation "Integration of Ukrainian scientific research into the international space: regional aspect", dedicated to the 100th anniversary of Bohdan Khmelnytskyi Melitopol State Pedagogical University (15-17). April 21, 2023. Zaporizhzhia: FOP Odnoroh T.V. [in Ukrainian]*

6. *Baiteriakov, O., & Voronova, V. (2024). Topological analysis of the automobile transport network of Zaporizhzhia region. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology", (60), 137-158. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-10 [in Ukrainian]*
7. *Bondar, N.M. (2014). Development of transport infrastructure of Ukraine on the basis of public-private partnership: monograph. Kyiv: NTU. [in Ukrainian]*
8. *Hashchuk, P., & Tymoshenko, Y. (2020). Definition and Content of the Concept «Transport System». Bulletin of Lviv State University of Life Safety, 22, 66–77. https://doi.org/10.32447/20784643.22.2020.09 [in Ukrainian]*
9. *Grytsevych, V., & Senkiv, M. (2014). Topology and metrics of motor space as a factor of transport and logistics activity in Western region of Ukraine. Geopolitics and eco-geodynamics of regions, 10(2), 483-488. [in Ukrainian]*
10. *Hudyma, R.R. (2013). Assessment of the basic level of transport security of the border region. Socio-economic problems of the modern period of Ukraine. Mechanisms of interaction of economic relations subjects in the cross-border space, 4 (102), 75-83. [in Ukrainian]*
11. *Physical geography of Zaporizhia region. (2014). Melitopol, Ukraine: Bohdan Khmelnitsky Melitopol state pedagogical university. [in Ukrainian]*
12. *Frishchev, S.G. (2006). General course of transport. Kyiv: Higher Education. [in Ukrainian]*
13. *Zagurskiy, O.M. (2018). Vehicle Access of Village Areas: Methodological Approaches. Automobile Transport, (43), 65. https://doi.org/10.30977/at.2219-8342.2018.43.0.65 [in Ukrainian*
14. *Kudriashov, A., & Mazurenko, A. (2021). Analysis of the Existing Route Network of the City of Marhanets. Transport systems and transportation technologies, (21), 16. https://doi.org/10.15802/tstt2021/237634 [in Ukrainian]*
15. *Mezentsev, K.V. (2005). Socio-geographic forecasting of regional development: Monograph. K.: Kyiv University Publishing and Printing Center. [in Ukrainian]*
16. *Melnijchuk, M.M., & Kovalchuk, S.I. (2012). Defined Car Transportion Access to Major Populated Area of the North-Western Region of Ukraine. Nature of the Western Polissia and adjacent territories: collection of scientific papers. Lutsk: Lesya Ukrainka Volyn National University, (9), 106-119. [in Ukrainian]*
17. *Naumenko, A.P., & Makarevich, D.O. Development of international road transport within the framework of transport corridors of Europe and Ukraine. https://jrnl.nau.edu.ua/index.php/PPEI/article/view/468/456 [in Ukrainian]*
18. *Nelipa, K.H. (2019). Transformation of the settlement system of Zaporizhia region (socio-geographical study) [Extended abstract of PhD dissertation]. Taras Shevchenko National University of Kyiv. [in Ukrainian]*
19. *Nesterenko, H.I., Muzykin, M.I., Bibik, S.I., & Shvaiko, A.Yu. (2023). Analysis of transport networks and road transport organization in European countries. Systems and Technologies, 63(1), 88-99. https://doi.org/10.32782/2521-6643-2022.1-63.7 [in Ukrainian]*
20. *Pylypenko, I.O. (2010). Assessment of changes in the peripherality of administrative units on the example of the Kherson region. Bulletin of Taras Shevchenko Kyiv National University. Series: Geography, (57), 31-33. [in Ukrainian]*
21. *Pidgrushnyi, G.P., Nagirna, V.P., & Fashchevskyi, M.I. (2012). Integral potential of the territory - theoretical and practical aspects of the research. Monograph. Kyiv. https://igu.org.ua/sites/default/files/igu-files/mono/ipt.pdf [in Ukrainian]*
22. *Plekan, U., Lyashuk, O., Rozhko, N., & Tson, O. (2022). Improvement of the Social Function of the Transport Industry of Ukraine. Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences, 1(6(37)), 157–166. https://doi.org/10.32515/2664-262x.2022.6(37).1.157-166 [in Ukrainian]*
23. *On providing information on the length of highways in new districts of the Zaporizhzhia region dated 10.25.2021, No. 79-B-277-e. (2021). Zaporizhzhia Regional State Administration. [in Ukrainian]*
24. *On providing information dated 10/22/2021, No. 10/2862. (2021). Service of highways in the Zaporizhia region. [in Ukrainian]*
25. *Puhach, S., & Novosad, S. (2015). The Interpretation of Concepts "Transport Accessibility" and "Space Compression" in Modern Scientific Literature. Actual problems of country studies: materials of the 3rd International scientific and practical Internet conference (28-31). Lutsk: Vezha-Druk. [in Ukrainian]*
26. *Rodashchuk, G.Yu. (2014). Determination of the transport infrastructure level of development in rural areas. Collection of scientific works of the Uman National University of Horticulture. 86 (2). 81-90. [in Ukrainian]*
27. *Silchenko, Yu.Yu., Semeniuk, L.L., & Zarubina, A.V. (2017), Analysis of the impact of transport accessibility on the socio-economic development of Kirovograd region. Scientific Bulletin of Kherson State University. Series: Geographical sciences, (7), 81-87. [in Ukrainian]*
28. *Solovyova, O.O., Vysotska, I.I., & Gerasimenko, I.M. (2019). General course of transport. Kyiv: NAU. [in Ukrainian]*
29. *State and development of regional transport. Statistical bulletin (2019). State Statistics Service. Main Department of Statistics in Zaporizhzhia region. Zaporizhzhia. [in Ukrainian]*
30. *Fatiukha, N.G. (2016). Statistical Estimation of Development Automobile Transport in Zaporizhzhya Area. Efficient economy, 4. http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=4885 [in Ukrainian].*
31. *Number of Present Population of Ukraine, as of January 1. (2022). Kyiv, Ukraine. State Statistics Service of Ukraine. https://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2022/zb/05/zb_Nas.pdf [in Ukrainian]*
32. *Borsuk, Y. (2024). Topological analysis of roadway and railway networks of the Ukrainian-Polish borderlands (on the example of Lviv Oblast and Subcarpathian Voivodeship). Journal of Geology, Geography and Geoecology, 33(1), 44-53. https://doi.org/https://doi.org/10.15421/112405.*

33. *Hla, S.S. (2019). A geographical analysis on transportation system in Pakokku district. IJCIRAS (International Journal of Creative and Innovative Research in All Studies), 2(4), 3-13. http://www.ijciras.com/PublishedPaper/IJCIRAS1369.pdf.*
34. *Jakimavičius, M., & Burinskienė, M. (2007). Automobile transport system analysis and ranking in Lithuanian administrative regions. Transport. XXII (3), 214–220.*
35. *Kutadinata, R., Dey, S., & Leow, D. (2021). Relative Mobility Analysis of a Public Transport Network in Comparison with Car Travel. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2675(11), 214-225. https://doi.org/10.1177/03611981211054822.*
36. *Nesterenko, H.I., Muzykin, M.I., Strelko, O.H., Bibik, S.I., & Aleksieieva, A.O. (2023). Analysis of possibilities for integrating the transport system of Ukraine into the European transport network. Systems and Technologies, 66(2), 97-107. https://doi.org/10.32782/2521-6643-2023.2-66.11.*
37. *Rodrigue J.P. (2024). The Geography of Transport Systems. New York: Routledge. https://doi.org/10.4324/9781003343196.*
38. *Roy, A., Fuller, D., Nelson, T., & Kedron, P. (2022). Assessing the role of geographic context in transportation mode detection from GPS data. Journal of Transport Geography, (100). https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2022.103330.*
39. *Sajous, P., Salze, P., & Bailly-Hascoët, V. (2020). The automobile system and transport models: developments for future mobility planning. The death and life of automobile mobility Flux 2020/1, (119-120), 173-184. https://shs.cairn.info/journal-flux-2020-1-page-173?lang=en.*
40. *Zhang, H., Liu, Y., Shi, B., Jia, J., Wang, W., & Zhao, X. (2021). Analysis of Spatial-Temporal Characteristics of Operations in Public Transport Networks Based on Multisource Data. Journal of Advanced Transportation, 2021(1), https://doi.org/10.1155/2021/6937228.*

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 4 April 2025
Accepted 5 October 2025

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-11
UDC 911.3:004.738
Received 30 May 2025
Accepted 22 September 2025

Preservation of Urban Heritage and Promotion of Tourism within the Framework of Algerian Law Using GIS. Case Study: Urban Heritage of the Beni Yellman Casbah, M'sila

Mourad Bouhlal [1]
PhD, Laboratory of Urban Technologies and Environments,
Institute of Management and Urban Techniques, [1] University of M'sila, M'sila, Algeria,
e-mail: mourad.bouhlal@univ-msila.dz, https://orcid.org/0000-0002-1242-5116;
Bousmaha Said [2]
PhD, Polytechnic School of Architecture and Urbanism (EPAU),
ETAP/IAU [2] University of Blida, Blida, Algeria,
e-mail: s.bousmaha@epau-alger.edu.dz, https://orcid.org/0000-0002-9447-4332

ABSTRACT

Problem Statement. This study addresses the integration of Geographic Information Systems (GIS) with the Algerian legal framework for heritage protection, with a particular focus on Law 03/03 Related to the protection of archaeological sites and areas of tourism development, which includes several and legal and regulatory texts provisions dedicated to safeguarding heritage sites from neglect or encroachment. The case of the Casbah of Beni Yellman in M'sila province – an urban settlement dating back to the 9th century – was selected to demonstrate how spatial technologies can contribute to the documentation and preservation of heritage as well as an attempt to convert legal texts and materials into spatial layers and geographic maps.

The purpose. Algeria boasts a rich urban heritage resulting from the succession of multiple civilizations (Byzantine, Roman, and Islamic) The province of M'sila represents a vivid example of this wealth, particularly through its urban and architectural landmarks such as the Casbah of Beni Yellman, which dates back to the ninth century AD.

This research aims to highlight the importance of using Geographic Information Systems (GIS) in protecting and documenting architectural heritage, while promoting tourism by aligning it with Algerian laws related to the protection of urban archaeological sites, particularly Law 03/03.

Research methodology. To map and delineate the boundaries of the Casbah of Beni Yellman, along with its access routes and pathways, the study relied on field surveys that combined Global Positioning System (GPS) Using the Garmin 62 GPS device data with ArcGIS 10.8 for the georeferencing of the site, the definition of its boundaries, access paths, and surrounding buffer zones The analysis revealed the areas most vulnerable to encroachment and provided an evidence-based tool to support local authorities in implementing the provisions of Law 03/03 Especially concerning protected and restricted areas.

The results. The study demonstrated that Geographic Information Systems are an effective tool for safeguarding and documenting architectural and urban heritage. They contribute to the implementation of heritage protection laws under Algerian Law 03/03, particularly in defining the buffer zones specified by the law. GIS also supports decision-making and enhances tourism by linking spatial precision with legal compliance Furthermore, the study confirmed the potential of applying this technology to multiple sites rich in urban, architectural, and natural heritage Where this study can be applied to the other archaeological sites in the Algerian state.

Keyword*: Urban Heritage, Tourism, Preservation, Geographic Information Systems (GIS), Law 03/03, buffer zones, Beni Yellman Casbah, M'sila province.*

In cites: Bouhlal Mourad, Said Bousmaha (2025). Preservation of Urban Heritage and Promotion of Tourism within the Framework of Algerian Law Using GIS. Case Study: Urban Heritage of the Beni Yellman Casbah, M'sila. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 145-156. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-11

Introduction

Heritage comes in many shapes – in tangible forms such as sites, buildings, landscapes, or as intangibles, like memories, emotions, values and customs – as does the use of heritage, ranging from the purpose of building nations to marketing places. Heritage usually represents a phenomenon within a traditional historical discourse but have lately, more and more, come to take in peripheral appearances; often emanating from groups at the fringes of that traditional discourse as well. The use of heritage occurs in different arenas and takes on significance as a vehicle for political, cultural and entrepreneurial purposes, as well as educational and emancipator, to name just a few How to interpret heritage in order to understand its meaning to different groups is therefore a very important task]1[.

GIS technology offers great opportunities for the development of applications using maps and visualisation methods in the field of spatial management. This technology integrates common database operations with the unique visualisation and geographic analysis. For that is necessary to use non spatial and spatial data. GIS is used for bringing the georeferenced data (spatial and non spatial) of any geographic location into digital maps]2[.

Despite serving as a medium for the interpretation, dissemination, iterative accumulation, and active inheritance of historical memory, cultural heritage is also susceptible to degradation and destruction]3[.

© Bouhlal Mourad, Said Bousmaha, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

has recently elevated the role of GIS in cultural heritage management]4[.

Like other countries in the world, Algeria is rich in numerous diverse archaeological sites that are classified as part of the world's cultural heritage. In order to preserve them, Algeria began at the start of the 21st century to establish the foundations of a new national policy for the protection and development of its cultural heritage in general, and real estate cultural heritage in particular. This policy is based on a comprehensive and forward-looking vision for sustainable development. Real estate heritage is considered one of the most important pillars of comprehensive developmental movement, and its protection and preservation presents a significant challenge to researchers and various stakeholders in the institutions overseeing historically and culturally significant sites.

The objective of the research

- The attempt to integrate GIS with the Real Estate Conservation Law and Tourism Promotion Law of Algeria, No. 03/03, in order to create a database that outlines the boundaries of the Kasbah of Bani Yilman, as well as to develop a map showing its geographical location in the M'sila Province of Algeria.

- Promoting cultural tourism: Utilizing geographical data to enhance the management of tourist sites and attract visitors.

- Compliance with Law 03/03: Ensuring that the efforts made align with the legal provisions.

Here's the English translation of your text:

Materials and Methods

- Legal framework: Algerian Law 03/03 on heritage protection.

- Cartographic and geospatial data: topographic maps, photographs, and recent satellite images.

- Defining the scope of the study using a GPS-MAP 62 device.

- GIS software: ArcGIS, for buffer zone creation and classification.

- Georeferencing The georeferencing of maps was performed with a Root Mean Square Error (RMSE) of less than 3 meters, ensuring acceptable accuracy.

- Buffer Zone Delineation: A buffer zone of approximately 500 meters was created around the centroid of the Kasbah, in accordance with the requirements of Law 03/03.

Literature review

- The study titled Emerging trends in GIS application on cultural heritage conservation: a review Published in the journal Heritage Science (2024) Several practical applications of GIS in the restoration and preservation of cultural sites were discussed Examples were provided on how GIS is used to monitor changes in historical sites, study environmental impacts and human activities on them, and also to develop sustainable protection strategies The study concluded that the use of GIS in cultural heritage conservation opens new horizons in the field of sustainable preservation, and that there are significant opportunities to improve these tools and use them more effectively in the future]5[.

- The second study The study titled Sustainable Tourism Development Based on Spatial Analysis Published in the journal of Cases on Information Technology (2023) The study highlighted how to effectively utilize and manage tourism resources to achieve sustainable and coordinated development of the environment, economy, and society Taking a tourist city in southwestern China as a backdrop, this study conducts an empirical investigation on assessing the suitability of tourism development Through spatial quantitative analysis, the study concluded that government support is a crucial factor in regional tourism development A resource integration development model, an optimization and coordination model, and a guided development model were proposed. The implementation of these models requires joint efforts and cooperation between the government, tourism development investors, and other relevant parties]6[.

- The third study, entitled Application of GIS in archaeological site detection and cultural heritage preservation, was published in International Journal of Research in Engineering journal in the year (2024). Researcher Alaa Abdulhadi Abbas attempted to use the latest applied geospatial technologies at the site for purposes of preservation and management related to the archaeological heritage of Ur in Iraq. In this study, we created a Geographic Information System (GIS) database that includes satellite imagery, aerial photographs, Ground Penetrating Radar (GPR) data, and precise field surveys.

This study helped identify and map archaeological features, providing a comprehensive picture of the site's geospatial nature. This integration enabled a thorough comparative study between historical maps and current remote sensing data to detect any changes in the landscape Most importantly, this interdisciplinary approach emphasizes the significance of digital technologies in safeguarding cultural assets, enabling collaboration among various stakeholders.

Through his research, Abbas also sought to establish a GIS database to assist authorities in heritage preservation, providing data for continuous monitoring. The study further highlights the importance of geospatial technologies in ensuring the survival of historical assets for future generations]7].

There is also another study entitled Leveraging GIS for sustainable tourism development, was published in Applied and Computational Engineering in the year (2025). The study highlighted the applica-

tion of GIS as a pivotal tool in spatial analysis and sustainable tourism development. Through mapping tourism resources, planning accessibility and infrastructure, it also sought to emphasize the role of GIS in designing personalized travel routes, risk management, environmental impact assessments, resource management, environmental conservation, stakeholder engagement, and community planning.

Furthermore, this research sheds light on the crucial role of GIS in shaping future tourism practices, stressing the importance of spatial analysis in promoting a balanced tourism approach that benefits local]8].

Definition of heritage. Cultural Heritage refers to the contemporary society's use of the past. "Our cultural heritage" contributes to the shaping of national stereotypes and regional identity and it's a modern or postmodern reflection of the past. In Europe it is often associated with older city centers. In North America, it is strongly linked to national parks, museums and galleries in urban areas. In Australia and New Zealand, it is also associated with the indigenous culture, identity and landscape]9[.

The concept of real estate heritage according to international charters Heritage is a cultural wealth for all nations, reflecting their history and authenticity. Therefore, both peoples and governmental and non-governmental organizations have started to research the concept of heritage and how to preserve and enhance it]10[. Several international conferences and charters have been held on this matter, the most important of which are:

- The Athens Charter for the Restoration of Historical Monuments (1931).

- The Venice Charter for the Restoration and Preservation of Monuments and Sites (1964).

- The Burra Charter, which emerged from the International Council on Monuments and Sites (ICOMOS). Conference in 1979, focusing on the preservation of places of archaeological and cultural significance]11[.

- The Dubai Charter, published during the First International Conference titled "Preserving Architectural Heritage Between Theory and Practice" in 2004, which aims to find ways to preserve and restore archaeological sites.

- Urban heritage sites "These include buildings associated with a distinctive natural environment, either in their natural state or man-made."

- This definition includes elements that are closely related to the concept of real estate heritage, due to the integration they form. Heritage buildings provide us with the history and culture of the people who inhabited them, while the heritage areas reflect the events of the era in which they were constructed. As for urban sites, they represent the characteristics of the community, where we find urban values alongside customs and traditions.

Heritage is perceived as a comprehensive concept that engages a relationship with the community it represents. From this perspective, the significance of heritage is attributed not only to objects and places, but also to the meanings and uses that society attaches to them, as well as the values it bestows upon them, all within a continuous interplay of interactions and transactions between people and places. This could be described as an "act of reintegrating memories into frameworks of life that are open to the present and the future", which shifts the heritage issue from a concern solely for traditional preservation to a second logic that can be viewed as projective]12[.

Some possibilities of GIS application in tourism planning and sustainable tourism development. A very useful platform is the GIS (Geographical Information System), which allows data to be managed and analysed with extreme precision. A GIS consists of geographical data stored in a database, software and the computer hardware that supports it the database contains all the data, stored in digital form. This platform has applications in land and building registration, for processing environmental]13[.

The use of GIS technology enhances the interpretation of complex data sets, transforming raw data into actionable insights]14[.

Remote sensing technology and GIS have been widely developed and applied globally to research, monitor, and track LULC changes. Remote sensing satellites are the most-used data source to detect, quantify, and map both current land use and LULC changes because of their ability to collect multitemporal spatial data in the form of precisely geolocated]15[.

The phenomenon of tourism is interdisciplinary, and representatives of many different scientific disciplines are investigating it – the fact, which testifies to its complexity and multidimensionality]16[.

Enhancement Strategies]17[, notes that certain cities renowned for their architectural heritage and the events they host have transformed into attractive tourist destinations. Whether well-known or less famous, these cities offer visitors innovative experiences They also organize themselves to attract diverse clientele, enrich their offerings, and extend the length of tourist stays]18[.

Tourism is an activity which depends on natural resources, but is also a phenomenon which can have a destructive effect on the natural geographic environment in case of an inadequate access to its planning and development Negative impacts of tourism on the environment are manifested primarily through its degradation by the mass tourist visits and

the construction of tourism infrastructure in inadequate areas. In addition, during the daily management and operations of tourist facilities, a large number of tourists are a big consumer of energy and water and at the same time produce a significant amount of solid waste, hazardous gases and waste water.

These negative impacts can be prevented or reduced by the application of certain GIS technology in order to achieve sustainable tourism development. Main applications of GIS in planning and management of sustainable development of tourism include the following activities:

- inventory of natural and cultural resources of a destination;
- determining the shortest path between two or more places;
- planning and determining the appropriate location for the development of tourism;
- promotion of a tourist destination;
- determining paths and attractions suitable for sustainable tourism]19[.

Protection of architectural heritage according to law no. 03-03 related to expansion areas and tourist sites and its role in protecting antiquities

- This law was issued to define the principles, rules, and guidelines for the development, promotion, and management of expansion areas and tourist sites, as well as the preservation of cultural heritage and tourism resources. It focuses on using and exploiting cultural, artistic, and religious heritage for tourism purposes. The Algerian legislator has made it mandatory for the development and management of expansion areas and tourist sites to comply with the laws related to environmental protection, coastal management, and the protection of cultural heritage, particularly if these areas contain classified cultural and architectural heritage. This is achieved by incorporating them into the national land-use plan.

- The legislator has also allocated special protection to classified tourist sites and expansion areas designated as protected zones, through several measures aimed.

- Obligation to respect urban planning and development rules during the use and exploitation of land within protected areas

- Ensuring the protection and preservation of these areas and sites from all forms of pollution and environmental degradation, whether natural or cultural.

- Subjecting the granting of building permits in these areas to special procedures, including obtaining a prior opinion from the ministry responsible for tourism, in coordination with the administration responsible for culture]20[.

It is worth noting that this law does not only provide legal protection for heritage in certain aspects but also extends to offering criminal protection Article 41 of the law allows legally established associations to take action in protecting the environment, urban development, and cultural, historical, and tourist landmarks. These associations can act as a civil party in cases of violations related to this law.

Therefore, it can be said that Law No. 03-03, related to expansion areas and tourist sites, and its role in protecting antiquities, has significantly contributed to the protection and preservation of architectural heritage, both directly and indirectly, as evidenced by the numerous provisions it contains.

Study area. The M'sila Province emerged from the administrative division of 1947, which increased the number of provinces in Algeria from 15 to 31 Prior to this date, the M'sila region was part of the Setif Province M'sila is located in the heart of northern Algeria, serving as a connecting link between the eastern and western regions of the country, as well as between the northern and southern parts of the nation. It belongs to the region of the High Plateaus and covers an area of 18,175 square kilometers. The population of M'sila is approximately 669,200 people, with a population density exceeding 66 people per square kilometer It is bordered by the following provinces: To the north: Bordj Bou Arréridj Province, Setif Province, and Bouira Province To the south: Biskra Province and Djelfa Province. To the east: Batna Province To the west: Médéa Province]21[.

This study focuses on Beni Ilman is located north of the Wilaya of M'Sila, 65 kilometers away, while the old Kasbah is situated at the foot of Mount Kharat, approximately 5 kilometers from the town center. Its foundation dates back to the 4th century Hijri, established by Sheikh Yalman bin Muhammad Al-Idrissi Al-Hasani.

The Kasbah includes a prayer mosque called *The Great Mosque* and a school for teaching the Quran known as *"Al-Zawiya Al-Siddiqiyya"*.

Satellite image data acquisition. Satellite images (Landsat 8) were used to map land use and delineate the boundaries of the Beni Yelmen archaeological area After traveling to the site, we used a Global Positioning System (GPS) device (Garmin GPSMAP 62) to identify seven points as geographic coordinates, utilizing Global Mapper v18.0 after downloading the image from an online data source.

The satellite images listed in Table 1 were geometrically corrected to the Universal Transverse Mercator (UTM) coordinate system, Zone 31 North Sahara, based on the WGS84 datum.

As a final product, we delineated the boundaries of the Beni Yelmen archaeological area on the aerial image and assigned geographic coordinates as a digital identifier for the archaeological site using digital software such as ArcGIS, Global Mapper, and others.



Map No. 01: Location of M'Sila Province within the country of Algeria



Map No. 02: Location of the commune of Beni Ilmane within M'Sila Province



Map No. 03: Administrative boundaries of the commune of Beni Ilmane

Source: Prepared by the researchers based on reference maps from the Algerian Ministry of Tourism

Here is an fig No.02 depicting the historical Kasbah of Bani Yelmen in the m'sila province of Algeria, showing signs of population and activity It reflects the traditional architecture and the lively.

Field images are considered an important part of scientific work in the fields of urban planning and engineering. They take us to the Kasbah of Bani Yilman for fieldwork, collecting information to document the current status of the Kasbah. The following images illustrate the physical part of the Kasbah as an architectural and touristic heritage.

Integrating ARCGIS software from the Tourism Promotion and Heritage Conservation Law. First and foremost, the following aspects are considered for the preservation of cultural landscapes: legislative recognition, the establishment and operation of an appropriate state management system, inclusion in strategic, programmatic, and spatial planning documents, development of regulatory and methodological support, and advancement of scientific research in the areas of identification, classification, mapping visualization, and promotion]22[.

After communicating with the Directorate of Tourism of M'sila Province, information was collected about sites classified as part of the architectural and urban heritage of the province A map containing a database identifying the locations of this heritage was prepared with the aim of preserving it and promoting tourism using the ARCGIS 10.8 program.

This was implemented within the framework of Law 03/03 concerning the protection and preservation of architectural and urban heritage in Algeria. All historical sites indicated on the map are subject to the provisions of this law.

In this study, the integration of Law 03-03 with Geographic Information Systems refers to the process of translating the provisions of the law related to the protection of heritage sites into spatial parameters that can be represented and analyzed within the ArcGIS environment.

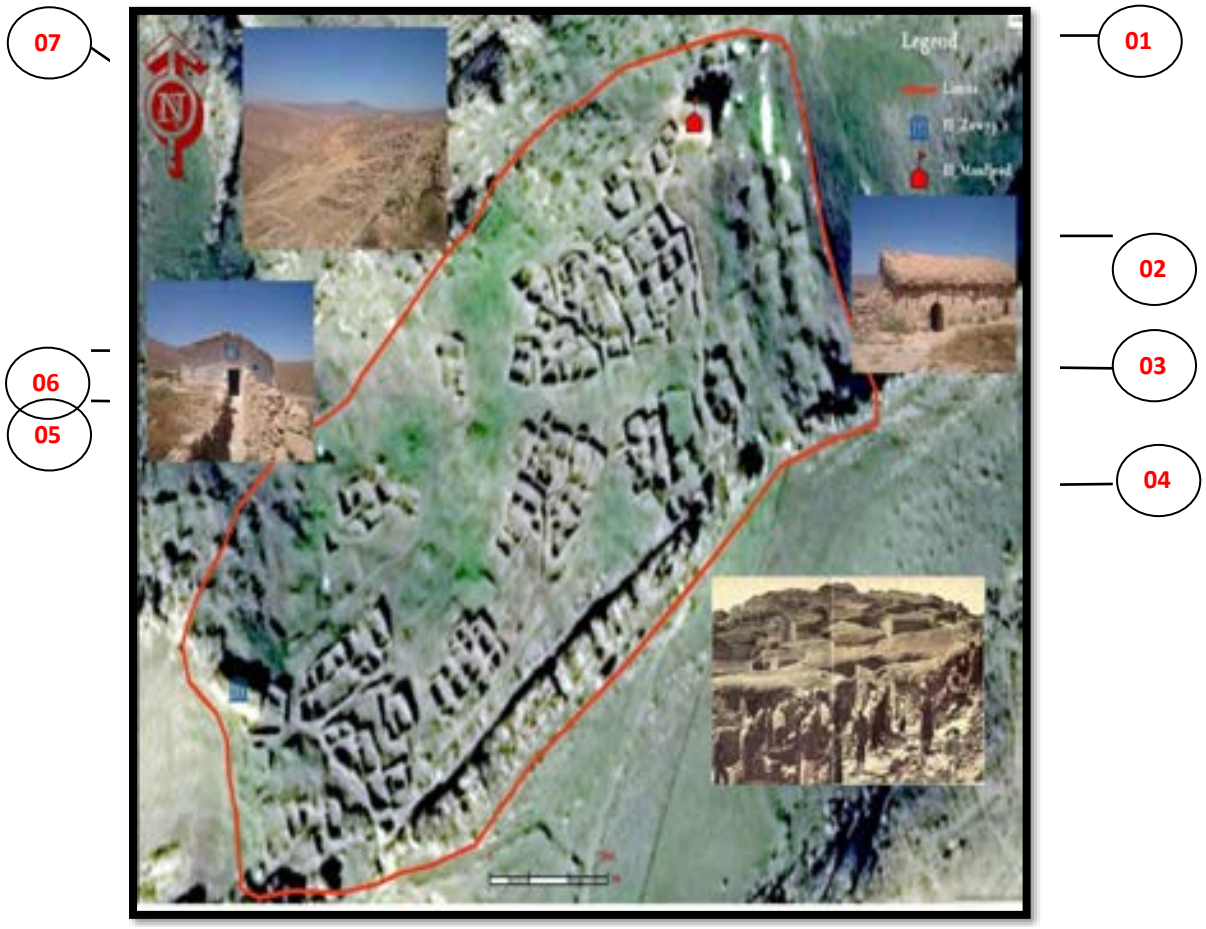


Fig. 1. Aerial view of the Kasbah of Beni Ilmane (*Source:* Aerial image + researchers' processing)

Table 1

THE coordinates of Kasbah Beni Ilman based on the World Geodetic System (WGS) UTM North Sahara Projection 1959 Zone 31

	Unit	X (m)	Y (m)	Source	Purpose	Tools Used
Coordinates	**01**	598920.165	3982154.491	Coordinates from an image Geotif Using a program Global Mapper v18.0 Open source	Extensive spectral bands, thermal infrared imaging	**Google Earth Pro**
	02	598948.014	3981950.708			
	03	598934.437	3982016.557			
	04	598913.102	3981897.330			
	05	598884.864	3981906.743			ArcGIS
	06	598847.123	3981912.704	Landsat 8		
	07	598819.289	3982021.891			

Source: the researchers



Fig. 2. Shows the Kasbah in 1956 inhabited by residents (*Source:* Directorate of Tourism, M'Sila Province)



Fig. 3. Center of Kasbah Beni Illma



Fig. 4. Interior of a dwelling showcasing local construction materials in walls and ceilings



Fig. 5. The sign of the Great Mosque of the Kasbah, "Jami' al-Jumu'ah"



Fig. 6. Pathways in the Kasbah of Beni Illman



Fig. 7. Wooden doors used in the dwellings of Kasbah Beni Illman

Source: the researchers

Among the provisions of the Algerian Law 03/03 on the protection of archaeological areas is the definition of the direct protection zone, which is set at 500 meters from the center of the Kasbah, where construction or any other works are strictly prohibited.

This approach allows for the registration of all historical and cultural heritage objects, followed by the establishment and adjustment of historical boundaries. This approach has both positive aspects and drawbacks, as the protective zone from the centroid may not always cover the entire territory of the object, especially if it has an irregular shape (Figure 9).

The protective zone of a historical and cultural heritage object is set at 300 m from the polygon centroid in undeveloped areas and may be reduced depending on the surrounding development through contractual agreements.

The boundaries of the Beni Yellman Kasbah were determined based on a ministerial decree from the Ministry of Culture, which precisely defines the limits of the archaeological area.

The georeferencing process was performed using 12 ground control points, with a Root Mean Square Error below 3 meters, which is acceptable for urban heritage mapping.

Result and Discussion

- The study emphasized the necessity of preserving and documenting heritage through the creation of Geographic Information System (GIS) maps for the Beni Yellman Kasbah. These maps document landmarks, roads, and pathways.

- The study adopted digital archiving to develop a digital archive for storing and managing data related to urban and architectural heritage.

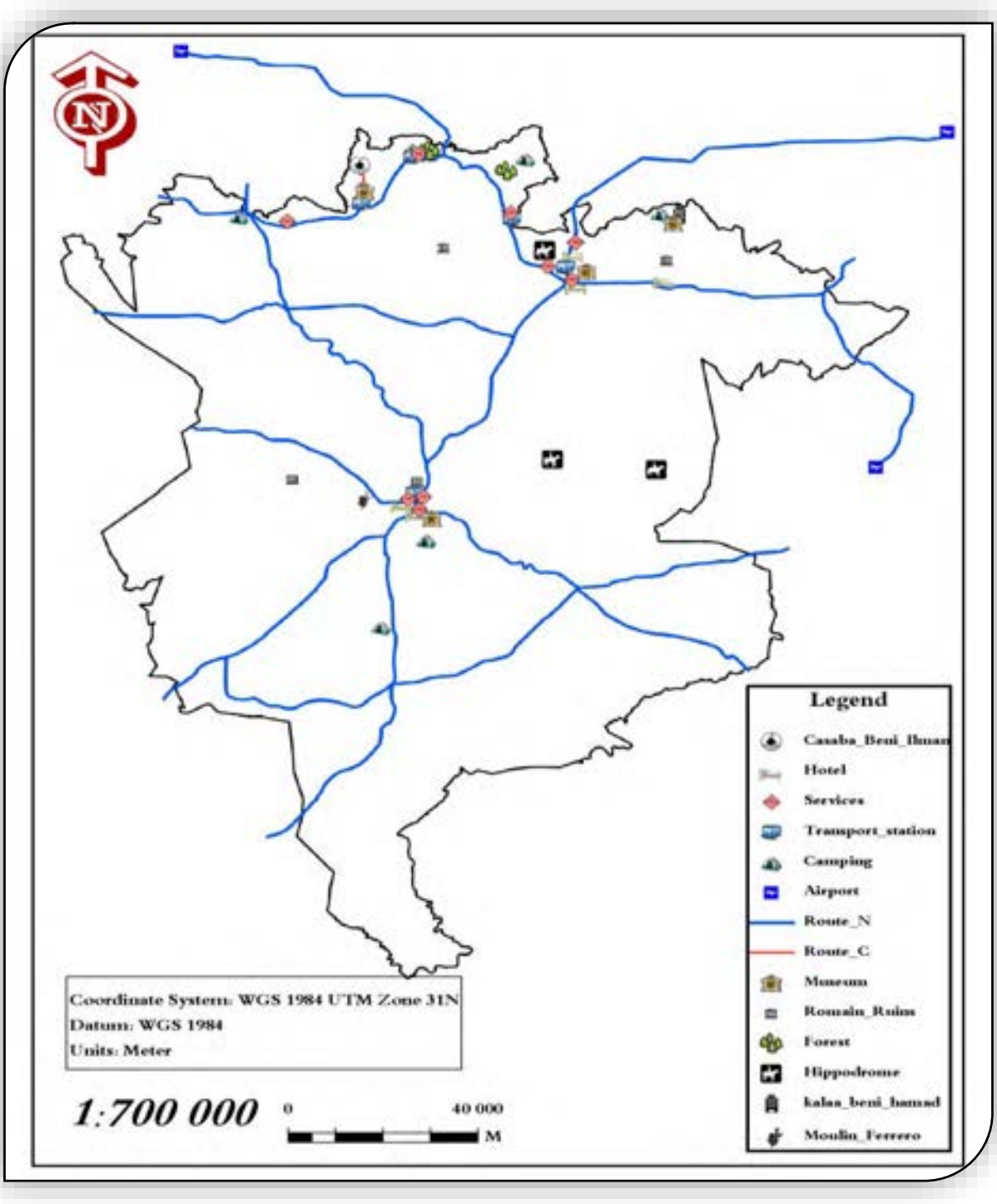
- Tourist routes leading to the Beni Yellman Kasbah in M'Sila Province were planned as part of the study.

- The study concluded that GIS supports the enforcement of Algerian laws, particularly Law 03/03, which focuses on the preservation of architectural and urban heritage and promotes tourism.

- Continuous monitoring is ensured by complying with legal procedures, such as tracking changes in land use or unauthorized modifications within the protected areas of the Beni Yellman Kasbah.

The Algerian Law No. 03/03 constitutes the legal framework for the protection of urban and real estate heritage This law encompasses several articles aimed at safeguarding heritage sites from neglect or encroachment, granting local authorities and relevant entities a key role in their preservation. GIS systems can facilitate the spatial inventory process of heritage sites listed under Law 03/03, helping to accurately delineate their boundaries.

GIS systems assist in implementing urban regulations to preserve the distinctive architectural heritage of the Kasbah of Beni Haman, in line with the



Map No. 04 contains a database showing the locations of architectural and urban heritage to preserve them and promote tourism (*Source:* the researchers)



Fig. 8. Buffer zones constructed around the centroid of the object and around the centroid of irregularly shaped polygons

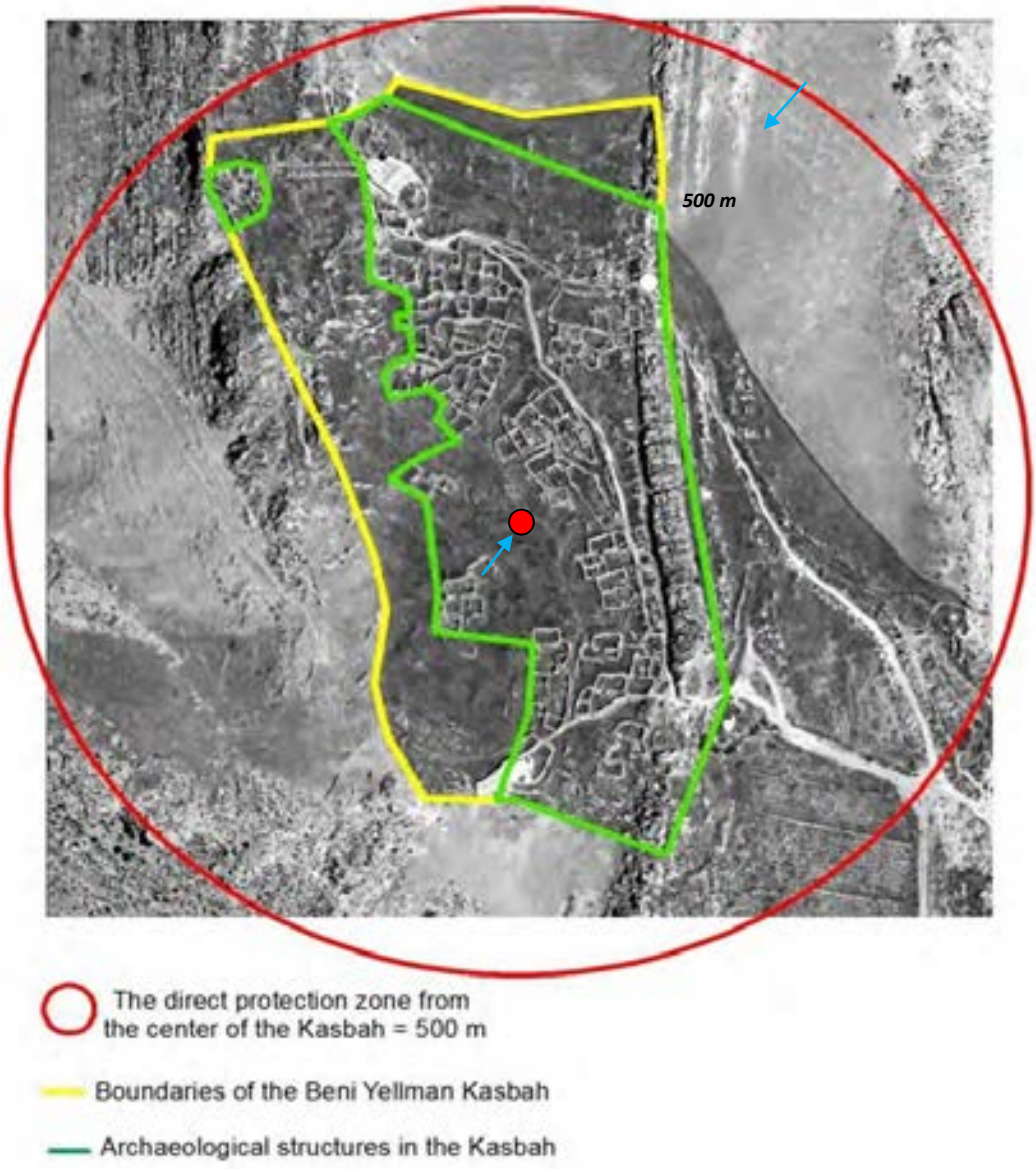


Fig. 9. Buffer zones were created around the center of gravity of the Kasbah of Beni Yelman using the ArcGIS program and defined according to Law 03/03 at 500 meters (*Source:* the researchers)

law's requirements.

By using GIS, clear boundaries for protected areas around the Kasbah (500 m) can be established and compliance monitored, preventing any violations or infringements.

Emerging trends in GIS application on cultural heritage conservation highlight its ability to not only monitor and protect heritage but also to enhance public engagement and understanding GIS allows for the visualization of historical data and the simulation of future scenarios, helping to predict the impacts of urban development and tourism growth As these technologies evolve, they will likely play a larger role in the integration of heritage conservation with tourism, ensuring that cultural sites like the Beni Yellman Casbah are preserved for future generations while benefiting from the positive aspects of tourism.

The first study Emerging trends in GIS application on cultural heritage conservation: a review, published in Heritage Science)2024) focused on emerging global trends in GIS applications It highlighted their importance in monitoring changes in historical sites, assessing environmental and human impacts, and formulating sustainable protection strategies. This study adopted a comprehensive and academic dimension, opening broad horizons for how GIS can evolve to shape long-term heritage protection policies and link them to sustainability.

In contrast, our study (Preservation of Urban Heritage and Promotion of Tourism within the Framework of Algerian Law Using GIS – Case Study: Beni Yellman Casbah, M'sila) was practical and centered on the Algerian context. It did not only highlight the technical potential of GIS but also sought to connect it with the Algerian legal frame-

work, particularly Law 03/03, which regulates the protection of urban heritage. Through the case of the Beni Yellman Casbah, the study demonstrated how digital maps and buffer zones can be transformed into practical legal tools that assist local authorities in monitoring, while at the same time promoting tourism by planning tourist routes in line with protection requirements.

On the other hand, both studies agree that GIS is no longer merely a technical tool but has become a strategic means for heritage conservation. Each highlighted the role of GIS in continuous monitoring, accurate documentation, and linking spatial data with decision-making.

Key differences between the two studies: the first study is theoretical in nature and provides a general review of global trends, whereas the second study is practical and tailored to a specific local context (the Beni Yellman Casbah, Algeria) Furthermore, the article Emerging trends in GIS application on cultural heritage conservation focuses on sustainability and long-term protection policies, while the Algerian study integrates legal protection with tourism development, showing how spatial tools can be transformed into executive mechanisms for the legislative framework.

The second study (Abbas, 2024) focused on the archaeological site of Ur in Iraq It relied on integrating multi-source data, including satellite imagery, aerial photographs, ground-penetrating radar (GPR) data, in addition to precise field surveys.

Its primary objective was to establish an integrated geospatial database that assists in identifying archaeological features and monitoring changes in the natural landscape, with emphasis on the technological and integrative dimensions of geospatial techniques.

The study was characterized by a multidisciplinary approach, highlighting how digital technologies can foster collaboration among various stakeholders and provide continuous monitoring tools to ensure the sustainability of historical assets for future generations.

In contrast, our study Preservation of Urban Heritage and Promotion of Tourism within the Framework of Algerian Law Using (GIS): Case Study of the Urban Heritage of the Beni Yellman Casbah, M’sila.

was distinguished by its focus on the Algerian local context, with a specific integration of GIS within the legal framework, particularly Law No. 03/03 on the protection of urban heritage It highlighted how digital maps and buffer zones can be transformed into practical legal tools to support local authorities in monitoring and control Both studies emphasized the role of establishing spatial databases as a means to enhance preservation and ensure sustainability.

As for the differences, the Iraqi study entitled Application of GIS in Archaeological Site Detection and Cultural Heritage Preservation concentrated on archaeological detection using advanced geospatial technologies (GPR, satellite imagery, historical comparisons), with a stronger emphasis on the scientific and technical aspects of uncovering archaeological features.

In our study, however, the focus was on legal protection and tourism development, where GIS was employed to activate national legislation and translate it into practical executive mechanisms, while highlighting the link between heritage preservation and the promotion of sustainable tourism.

The study entitled Leveraging GIS for Sustainable Tourism Development, published in Applied and Computational Engineering in 2025, demonstrates how Geographic Information Systems can play a pivotal role in sustainable tourism development It focused on a wide range of applications, including mapping tourism resources, planning infrastructure and accessibility, designing personalized travel routes, risk management, environmental impact assessment, resource management, and environmental conservation. This study highlights the comprehensive dimension of GIS in reshaping future tourism practices from a perspective of sustainability and inclusiveness.

From the comparison, it becomes clear that the study Leveraging GIS for Sustainable Tourism Development approached GIS as a global and strategic planning tool for sustainable tourism development, whereas our study focused on the legal and institutional dimension within the Algerian context, highlighting the relationship between urban heritage protection and the promotion of sustainable tourism.

Conclusions

In the context of this research, which addresses the topic of preserving architectural heritage and promoting tourism using (GIS) in light of Algerian Law No. 03/03, the study focused on the architectural heritage of the Bani Yilman Kasbah in the M'Sila province. The research highlighted the importance of preserving architectural heritage as a part of the nation's identity and culture, and the necessity of integrating modern technological tools such as GIS into preservation efforts. Law No. 03/03 is one of the key laws supporting the protection of architectural heritage in Algeria, providing a legal framework that contributes to organizing and encouraging work on preserving heritage sites, including promoting the use of modern technologies in this field. The study also demonstrated that the use of GIS in preserving the architectural heritage of the Bani Yilman Kasbah significantly improves the efficiency of documentation and monitoring pro-

cesses for these sites. Furthermore, GIS is an effective tool in boosting tourism by providing visitors with accurate information about the history and location of heritage landmarks, which helps attract tourists and stimulate the local economy.

In conclusion, the integration of architectural heritage with modern technology within a well-defined legal framework proves to be an effective tool for achieving a balance between preserving history and developing tourism, contributing to maintaining the community's identity and promoting sustainable economic development in heritage areas.

References

1. *Nilson, T. (2018). Cultural Heritage Preservation: The Past, the Present and the Future Halmstad University Press.*
2. *Alma, P. (2010). The Application of GIS in Tourism Planning and Sustainable Tourism Development Journal of Tourism and Hospitality Management. https://doi.org/10.35666/25662880.2015.1.456*
3. *Sesana, E. (2021). Climate change impacts on cultural heritage: a literature review. Wiley Interdiscip Rev Clim Chang.;12:1–29*
4. *Huang, Y. (2024). Bibliometric analysis of GIS applications in heritage studies based on web of science from 1994 to 2023. Herit Sci. 12:1–19. http://dx.doi.org/10.1186/s40494-024-01163-y*
5. *Beibei, L. (2024). Weixing Xu Emerging trends in GIS application on cultural heritage conservation: a review ,journal Heritage Science. https://doi.org/10.1186/s40494-024-01265-7*
6. *Xiangzhou, L. (2024). Sustainable Tourism Development Based on Spatial Analysis JanuaryJournal of Cases on Information Technology. http://dx.doi.org/10.4018/JCIT.354070*
7. *Alaa, A. (2024). Application of GIS in archaeological site detection and cultural heritage preservation, International Journal of Research in Engineering journal. https://doi.org/10.33545/26648776.2024.v6.i1a.52*
8. *Lanzhou, j. (2025).Leveraging GIS for sustainable tourism development, Applied and Computational Engineering Journal doi.org/10.54254/2755-2721/106/20240911*
9. *Boyd, S. Timothy, D. (2003). Heritage Tourism Upper Saddle River (NJ): Prentice Hall.*
10. *Boudhan, M. (2013). Legal system for the protection of national heritage, Dar Al-Huda, Ain Mlila, Algeria.*
11. *Ithman, M. (1999). Tourism Planning, Dar Al Maaref for Publishing and Distribution, Jordan.*
12. *Mansouri, L. (2023). Heritage Requalification Process Through Social Perceptions: The Case Of "Halle Volta" In Algiers. https://doi.org/10.31435/rsglobal_ijitss/30122023/8088*
13. *Anna, K. Szymon, K. (2024). The Analysis of the Main Geospatial Factors Using Geoinformation Programs Required for the Planning, Design and Construction of a Photovoltaic Power Plant, Journal of Ecological Engineering, https://doi.org/10.12911/22998993/183628*
14. *Ouhakki, H. all. (2024). Spatiotemporal Assessment of Groundwater Quality in the Oum Rbia Watershed Using GIS-Pro and Water Quality Indices, Journal of Ecological Engineering, https://doi.org/10.12911/22998993/191747*
15. *Bui, B. Thien, A. (2023). Using Land sat Satellite Imagery for Assessment and Monitoring of Long-term Forest Cover Changes in Dak Nong Province, Vietnam, Geographica Pannonica. https://doi.org/10.5937/gp27-41813*
16. *Krzysztof, G. Karol, K. (2024). Spatial Diversity of Tourism Attractiveness of the Nowy Sącz District, Using the Wroclaw Taxonomic Method. http://dx.doi.org/10.15576/GLL/2019.2.37*
17. *Marc, C. (2001).Le tourisme culturel de type urbain : aménagement et stratégies de mise en valeur.*
18. *Souad, B. (2024). Sustainable Development and Tourism of Urban Heritage: an Imperative for the Future Case of Dachra Hamra in El Kantara, Biskra, Algeria.*
19. *Alma P, Amina S. (2010). The Application of GIS in Tourism Planning and Sustainable Tourism Development Journal of Tourism and Hospitality Management. https://doi.org/10.35666/25662880.2015.1.456*
20. *Law No. 03-03 Related to Expansion Areas and Tourist Sites and Its Role in Protecting Antiquities.*
21. *Mourad, B. Djamel, D. (2025). Collective Social Housing in Semi-Arid Areas: Between Planning Approach and User Behavior Case Study: M'sila City. https://sciencejournal.re/index.php/studies-in-science-of-science/article/view/875*
22. *Polyvach, K. (2023). Cultural landscape as heritage: proposals for Ukraine from the experience of certain European countries. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (59), 190-208. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-14*

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Збереження міської спадщини та просування туризму в рамках алжирського законодавства з використанням ГІС. Тематичне дослідження: міська спадщина Касби Бені Єлл-ман, Мсіла

Мурад Бухлал [1]
Лабораторія міських технологій та середовища,
[1] Інститут управління та міських технологій, Університет Мсіли, Мсіла, Алжир;
Бусмаха Саїд [2]
Політехнічна школа архітектури та урбанізму (EPAU),
[2] ETAP/IAU Університет Бліди, Бліда, Алжир

Це дослідження розглядає інтеграцію геоінформаційних систем (ГІС) з алжирською законодавчою базою щодо охорони спадщини, з особливим акцентом на Закон 03/03, який містить кілька положень, спрямованих на захист об'єктів спадщини від занедбання або посягання. Випадок Касби Бені Єллман у провінції Мсіла – міського поселення, що датується IX століттям – був обраний для демонстрації того, як просторові технології можуть сприяти документуванню та збереженню спадщини. Це дослідження має на меті підкреслити важливість використання геоінформаційних систем (ГІС) для захисту та документування архітектурної спадщини, одночасно сприяючи розвитку туризму шляхом узгодження його з алжирськими законами, що стосуються захисту міських археологічних пам'яток, зокрема Законом 03/03.Для картографування та визначення меж Касби Бені Єллмана, а також шляхів доступу до неї, дослідження спиралося на польові дослідження, які поєднували дані Глобальної системи позиціонування (GPS) з ArcGIS 10.8 для геоприв'язки ділянки, визначення її меж, шляхів доступу та навколишніх буферних зон. Аналіз виявив райони, найбільш вразливі до заворушень, та надав інструмент, заснований на доказах, для підтримки місцевих органів влади у впровадженні положень Закону 03/03.Дослідження продемонструвало, що геоінформаційні системи (ГІС) є ефективним інструментом для охорони та документування архітектурної та міської спадщини. Вони сприяють впровадженню законів про охорону спадщини відповідно до Закону Алжиру 03/03, зокрема у визначенні буферних зон, визначених законом. ГІС також підтримує прийняття рішень та покращує туризм, пов'язуючи просторову точність з дотриманням законодавства. Крім того, дослідження підтвердило потенціал застосування цієї технології до багатьох об'єктів, багатих на міську, архітектурну та природну спадщину.

Ключові слова*: міська спадщина, туризм, збереження, геоінформаційні системи (ГІС), закон 03/03, буферні зони, Касба Бені Єллман, провінція Мсіла.*

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу
Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 30 травня 2025 р.
Прийнята 22 вересня 2025 р.

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-12
UDC 911+631.42+528.8.04
Received 31 March 2025
Accepted 9 May 2025

Study of natural-ecological conditions in agro-landscapes based on field surveys and remote sensing

Nizami Hummatov [1]
PhD (Biology), Associate Professor, Laboratory of Soil and plant analyses,
[1] Research Institute of Crop Husbandry, Baku, Azerbaijan,
e-mail: ngh.soil.phys@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-6689-8324;
Shahnaz Amanova [2,3]
PhD (Geography), Lecturer
[2] Baku State University, Faculty of Ecology and Soil Science, Baku, Azerbaijan;
[3] Khazar University, Department of Geography and environment, Baku, Azerbaijan,
e-mail: shahnaz.amanova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-7962-7073;
Asmar Ahmadova [1]
PhD (Agriculture), Laboratory of Soil and plant analyses,
e-mail: asmarakhmadova@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-9671-5849;
Ulviyya Isgandarova [4]
PhD (Geography), Senior Lecturer, Department of Geography,
[4] Nakhchivan State University, Nakhchivan, Azerbaijan,
e-mail: uisgenderova86@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-9875-1176

ABSTRACT

Problem definition. The number of undernourished people has dropped by almost half in the past two decades because of rapid economic growth and increased agricultural productivity. Under the conditions of climate change, natural and anthropogenic factors related to human activity lead to soil cover degradation, which leads to a decrease in soil fertility and ecosystem productivity, a deterioration in the socio-economic quality of human life, and generally creates serious problems in the country's food security. Failure to take into account the agrophysical, agrochemical, physicochemical and other properties of soils in land use, depending on agroecological conditions, leads to the degradation of agricultural lands and manifests itself in the form of soil salinization, mechanical deformation and compaction, erosion, desertification, decreased productivity of ecosystems, and other forms. Therefore, in conditions of intensive land use, the management of the productivity of agrocenoses depends to one degree or another on the assessment of the agrophysical and agrochemical state of soils, which plays a decisive role in detecting and controlling degradation and making proposals for solving this problem.

The purpose. The study was conducted in the cereal crops of the Lankaran-Astara (Jalilabad, Masalli, Lankaran) economic region of the Republic of Azerbaijan in the rainfed conditions with varying degrees of moisture. The study included cereal fields located in various rural areas of the administrative regions, as well as areas covering cereal crops of the Jalilabad Regional Experimental Station (RES) of the Research Institute of Crop Husbandry.

Research methodology. In accordance with the methodology, the studies were conducted in the relevant departments and laboratories of the Research Institute of Crop Husbandry using space (GIS technologies, Earth remote sensing) and terrestrial (soil agrophysical and agrochemical properties, grain yield and quality indicators) methods.

Conclusions. In terms of assessing the degree of erosion of soils, the structure vulnerability coefficient (Kz) is often used. Kz reflects the general structural quality of the soil in terms of its structural-aggregate composition. Structural degradation can lead to compaction and crusting of the soil surface, which reduces the rate of water infiltration, increases the risk of soil erosion and loss of the topsoil. The results show that the indicators characterizing the structural state of soils in all study regions (AVA, K_{str}, D_s) can be assessed as “very good” (AVA >60%) and “good” (AVA >50%) according to the existing gradations. The trend of NDVI changes indicates that cereal crops are already in the full ripening phase in the Jalilabad region at the end of May and harvesting has begun.

Keywords*: zero hunger, remote sensing, sustainable agriculture, cereal crops, Landsat images, food security, crop yield assessment, climate-smart agriculture, NDVI.*

In cites: Hummatov Nizami, Amanova Shahnaz, Ahmadova Asmar, Isgandarova Ulviyya (2025). Study of natural-ecological conditions in agro-landscapes based on field surveys and remote sensing. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 157-171. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-12

Introduction. In order to obtain high-quality and high-quantity agricultural crops in a changing climate, objective information on the temporal and spatial variability of the state of soil and vegetation cover is required [11, 22, 24]. Modern soil monitoring is mainly based on GIS technologies and remote sensing data [23]. The use of data covering different periods allows us to assess ongoing processes based on the differences detected in the state of objects [2]. Agroecological conditions, which are becoming more complicated due to anthropogenic impact in the context of climate change, necessitate operational monitoring of the state of agricultural lands [14]. Regardless of the cause, the process of soil degradation begins with a change in vegetation cover, its main dynamic characteristic – biomass [18]. To assess this change, various vegetation indices calculated from remote sensing data of the Earth in a

© Hummatov Nizami, Amanova Shahnaz, Ahmadova Asmar, Isgandarova Ulviyya, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

certain range of electromagnetic waves are used [8, 10]. For example, the MARS (Monitoring Agriculture by Remote Sensing) system, which serves the countries of the European Union, allows us to determine the state of cultivated areas and the productivity of agricultural crops on various scales.

In connection with the above, the relevance of the topic stems from the need to obtain objective information on the regularities of temporal and spatial variability of the state of soil and vegetation cover in the arable lands of some administrative regions of the republic and the factors determining it, and to effectively use soil, climate and plant resources in conditions of changing natural and anthropogenic influences.

The purpose of the study is to study, analyze and map the "inert" and dynamic parameters characterizing the state of soil and vegetation in the agricultural areas of the Lankaran-Astara (Jalilabad, Masalli, Lankaran) economic region of the Azerbaijan Republic using space (GIS technologies, Earth remote sensing) and terrestrial (field, laboratory) methods.

The object, methods and soil-climatic conditions of the study area. The climatic conditions of the study areas by economic regions can be characterized by the following indicators of perennial precipitation and temperature. The Jalilabad region has a mainly temperate-hot semi-desert and dry-steppe climate with a dry summer. The average temperature in January is 1-3 ^{0}C, in July 25-30 ^{0}C. The annual precipitation is 400-600 mm. The Masalli district has a semi-desert, dry-steppe and semi-humid subtropical climate with mild winters and dry summers. In summer, the temperature sometimes rises to 40 ^{0}C. In winter, the lowest temperature is -10 ^{0}C, and the highest temperature is 15 ^{0}C. The amount of annual precipitation varies between 450-650 mm. In the Lankaran district, a humid subtropical climate prevails. In such climatic conditions, the annual temperature reaches 14 ^{0}C, and the amount of precipitation reaches 650-1300 mm.

In accordance with the purpose of the study, the object of the study is the soil and vegetation used in agricultural use in various agro-ecological conditions. In the study areas, the agrophysical indicators of the top layer of soils (0-20 cm) – granulometric and structural-aggregate composition, moisture, density, porosity; agrochemical indicators – humus, carbonation, pH, electrical conductivity, mineral nutrients (NPK); grain yield and quality indicators of the plant – 1000-grain mass, vitreous, gluten, sedimentation and protein were determined using standard methods used in modern soil-plant analyses [3, 17, 19]. Landsat data are usually used for classification. Landsat data has several bands (blue, green, red, infrared, thermal, panchromatic) that differ in wavelength. The panchromatic band is used to increase the resolution of the data. Landsat 7 data has 8 bands, and Landsat 8 data has 11 bands [5].

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) is a simple and effective index widely used to determine the state of vegetation development [1, 4, 24]. This index is a normalized quantity that relates the absorption of red light (RED) by chlorophyll in green plants to the scattering of light in the near-infrared (NIR) range from the leaf surface [9, 16].

In general, healthy vegetation is highly sensitive to visible light [12, 20]. Chlorophyll in green plants absorbs blue (0.4-0.5 μm) and red (0.6-0.7 μm) light to a high degree, and reflects green (0.5-0.6 μm) light [17]. This is why we see healthy vegetation in green [7]. Healthy green plants highly reflect electromagnetic waves in the near-infrared (NIR) range of the spectrum, 0.7-1.3 μm [6, 15]. The calculation of NDVI is based on the absorption and reflection of electromagnetic radiation in the RED and NIR ranges, respectively [13].

NDVI is determined by the following formula:

$$NDVI = (NIR – RED) / (NIR + RED)$$

NDVI for Landsat 8 is calculated using Band 4 (RED) and Band 5 (NIR):

$$NDVI = (B05 – B04) / (B05 + B04)$$

Discussion and results. The SDGs aim to end all forms of hunger and malnutrition by 2030, making sure all people – especially children – have sufficient and nutritious food throughout the year. This involves promoting sustainable agricultural, supporting small-scale farmers and equal access to land, technology and markets. It also requires international cooperation to ensure investment in infrastructure and technology to improve agricultural productivity [21].

That is why the investigation of agriculture, agrolandscapes, and natural components is an essential issue. In the study areas of the regions, mainly gray-brown, chestnut, brown forest, alluvial meadow, pseudopodzolic yellow and pseudopodzolic gley yellow soils are distributed. The geographical coordinates and altitude above sea level of the places where soil and plant samples were collected in the study areas of all regions were determined using GPS, and satellite observations were conducted according to these coordinates (Table 1).

In GIS-technologies and Earth remote sensing, the processing of Landsat and Sentinel satellite images and the dynamics of several vegetation indices were determined using the ArcGIS software package. This allows us to monitor the development process of vegetation cover and determine the degree of soil moisture. To obtain the relevant information, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) was determined in the study areas. This will be discussed

Table 1

Vegetation cover, geographical coordinates and soil granulometry of the study areas

№	Plant	Geographic coordinates and altitude			Granulometric composition, %			Texture class (USDA)
		N (Y)	E (X)	Altitude (m)	Sand	Silt	Clay	
The Jalilabad district								
1	Wh	39°14.059'	48°26.787'	79	6.7	46.4	46.9	SC
2	Wh	39°14.329'	48°27.578'	66	7.6	45.7	46.7	SC
3	Ba	39°13.847'	48°27.396'	73	0.5	55.5	44.0	SC
4	Wh	39°13.392'	48°27.775'	65	3.4	41.7	54.9	SC
5	Wh	39°13.481'	48°27.921'	64	1.0	47.3	51.7	SC
6	Wh	39°12.398'	48°25.507'	131	1.0	47.2	51.8	SC
7	Wh	39°15.547'	48°21.799'	141	2.9	44.9	52.2	SC
8	Wh	39°11.710'	48°17.070'	326	5.3	36.6	58.1	C
9	Wh	39°15.004'	48°19.259'	165	0.0	48.0	52.0	SC
10	Wh	39°19.025'	48°23.507'	96	3.7	38.4	57.9	C
11	Wh	39°19.444'	48°26.878'	42	2.9	39.5	57.6	C
12	Wh	39°06.198'	48°36.154'	15	7.1	46.1	46.7	SC
13	Wh	39°15.917'	48°32.609'	0	1.9	29.8	68.3	C
14	Wh	39°18.286'	48°32.802'	5	6.6	41.4	52.0	SC
15	Wh	39°19.413'	48°31.816'	13	6.9	39.4	53.7	C
16	Wh	39°23.037'	48°32.336'	11	6.6	45.1	48.3	SC
17	Wh	39°19.098'	48°30.292'	24	1.3	31.1	67.6	C
18	Wh	39°17.653'	48°31.033'	16	2.9	44.3	52.8	SC
The Masalli district								
19	Wh	39°00.647'	48°42.363'	6	7.5	46.0	46.5	SC
20	Oa	39°01.587'	48°43.982'	27	21.1	40.5	38.4	CL
21	Wh	39°02.103'	48°47.396'	10	7.3	45.6	47.1	SC
22	Wh	39°00.525'	48°37.558'	58	5.5	40.7	53.8	SC
23	Wh	38°58.117'	48°40.151'	6	16.3	44.6	39.1	SCL
24	Wh	38°56.808'	48°39.780'	29	5.2	52.9	41.9	SC
The Lankaran district								
25	Wh	38°43.974'	48°49.726'	2	28.9	38.0	33.1	CL
26	Wh	38°40.930'	48°48.296'	11	13.1	47.5	39.4	SCL
27	Wh	38°48.594'	48°46.705'	12	33.0	30.1	36.9	CL
28	Oa	38°48.694'	48°45.992'	8	14.0	48.6	37.4	SCL

Note: Ba – *barley,* Wh – *wheat,* Oa – *oats, C – clay, SC – silty clay, CL – Clay loam, SCL – silty clay loam.*

in detail in the following sections of the report.

Results of the study and their discussion. According to the methodology, soil and plant samples were collected and analyzed from cereal fields in 28 villages and settlements within the Jalilabad, Masalli, and Lankaran districts, which are part of the Lankaran-Astara economic region.

Fundamental characteristics of soils – granulometry and texture class. The granulometric composition or texture of the soil expresses the relative percentage of sand (2-0.05 mm), silt (0.05-0.002 mm) and clay (<0.002 mm) particles in the soil. It is very important for understanding soil functions such as water retention and hydraulic conductivity, water and nutrient availability, accumulation and transport of pollutants, etc. Almost all physical, chemical and biological properties of the soil depend to one degree or another on the granulometric composition.

In essence, soil texture reflects the size distribution of particles – granulometric fractions (sand, silt, clay). There is no generally accepted universal classification of the boundaries of granulometric fractions in the world. Although the classification of the size distribution of granulometric particles is carried out according to different schemes in different countries, in most classifications the upper limit of the particle diameter for clay and sand fractions is taken as 0.002 mm and 2 mm, respectively. Currently, the most widely used is the International and the United States Department of Agriculture (USDA) classification scheme.

Accurate determination of the particle size distribution in the soil texture fraction smaller than 2 millimeters plays an important role in the application of many studies. Since it affects various pro-

cesses occurring in the soil and numerous soil properties, including pore size distribution, water retention and water permeability. These properties are of great importance for soil functions and ecosystem services – aeration, regulation of water and nutrient cycling and habitat for microorganisms, carbon storage and suitability for agricultural production.

The results of granulometry show that the granulometric composition of the soils in the study areas, determined by the Bouyocos method, is clay and silty clay in more than 90% of cases according to the classification of the US Department of Agriculture (Table 1, Figure 1). This type of soil is found in all regions except Lankaran. In the Lankaran and in some cases in the Masalli region, it is observed that the soils have a clay loam and silty clay loam granulometric composition.

Structural-aggregate composition of soils. Another agronomically important soil property that affects the productivity of agricultural crops and the stability of the soil-ecological environment is its structure and water stability. Soil structure is one of the main physical properties that ensure the movement and retention of water, water-soluble substances, gases, microorganisms, etc. in natural and agroecosystems. Soil structure is often a limiting factor for productivity and has a strong impact on many processes occurring in the soil. It regulates the water capacity of the soil, infiltration, gas exchange, the dynamics of organic and nutrient substances, the spread of plant roots in the soil and the tendency to erosion.

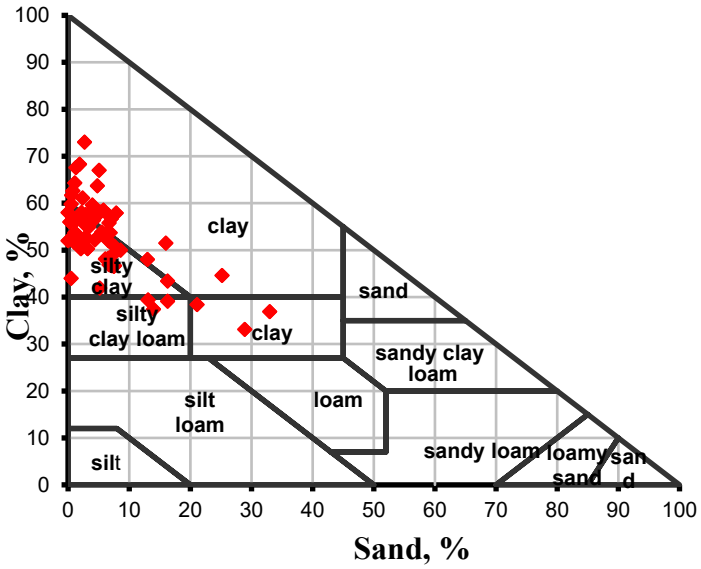


Fig. 1. Granulometric composition triangle

The concept of structure usually characterizes the spatial distribution or architecture of solid particles and voids or pores. Many soils have a hierarchical structure, that is, the initial mineral particles interact with organic matter to form small aggregates – microaggregates (<0.25 mm). Then, from the combination of these microaggregates, larger aggregates - macroaggregates (>0.25 mm) are formed. Organic matter plays the role of "cement" or "glue" in the formation of aggregates and structure. Without a structural hierarchy in loamy and clayey soils, they would be practically impermeable to liquids and gases. Thus, soil structure plays a decisive role in the transport of water, water-soluble substances and gases to the environment, and in transforming the soil into a favorable environment for the development of plants and other biological organisms.

There is no doubt that organic matter is one of the main components of soil structural stability. However, as a result of intensive cultivation of arable lands in agriculture, both soil structure and organic matter are gradually lost. Loss of structure and water stability in arable soil ecosystems is a widespread form of degradation. Soils with a high content of organic matter have relatively large aggregates that are more stable to mechanical action (compaction, deformation, etc.) and water action.

Improving soil aggregate stability has a number of positive effects for the agroecosystem (reducing the risk of erosion, etc.). The structural quality of the soil depends significantly on the amount of organic matter, especially its labile fraction. Labile organic matter also plays an important role in maintaining soil structure and providing the soil with nutrients. Soil aggregate stability is the cornerstone of its physical quality and can be improved by proper management of plant residues and organic amendments. In addition, precipitation also affects the structural state of the topsoil. Soil without vege-

tation cover (e.g., burning or removal of plant residues from the field) is in direct contact with raindrops, which leads to the disintegration of soil aggregates and an increased risk of soil erosion. Structural degradation can lead to compaction and crusting of the soil surface, which reduces the rate of water infiltration, increases the risk of soil erosion and loss of the topsoil.

Soil structure and its water stability are dynamic characteristics and are very sensitive to anthropogenic influences. As mentioned above, it directly affects the formation of a number of soil properties and plant productivity. The average values and ranges of variation (Lim) of structural and water stability indicators of soils in the study regions are given in Table 2.

Table 2

Average values of soil structural and water stability indicators*

district	Structural and water resistance indicators						
	AVA, %	K_{str}	D_S, mm	WSI, %	C_{AFI}, %	D_{sw}, mm	K_Z
Jalilabad	80.3 (54.7-94.5)	4.5 (1.2-7.9)	4.9 (3.1-8.5)	54.7 (28.2-75.3)	336 (134-624)	0.6 (0.3-0.9)	8.9 (5.5-14.7)
Masalli	71.0 (65.0-85.2)	2.7 (1.8-5.8)	6.8 (5.0-8.0)	60.9 (51.9-73.7)	721 (476-1023)	1.2 (0.8-1.8)	6.2 (4.0-8.6)
Lankaran	79.0 (77.6-80.3)	3.4 (2.6-4.0)	3.4 (2.3-5.5)	51.0 (46.2-54.6)	170 (112-302)	0.8 (0.6-1.1)	4.4 (2.4-7.9)

Note: * *– in brackets Lim = min-max, AVA – the amount of agronomically valuable aggregates (10-0.25 mm), K_{str} – structural coefficient [Σ(10-0.25 mm) / Σ(>10 mm + <0.25 mm)], D_s and D_w – mean weighted diameter of structural and water-stable aggregates [Σ(amount of fraction x mean diameter of the fraction) / 100], WSI – water stability indicator (amount of water-stable aggregates >0.25 mm), C_{AFI} – AFI water resistance criterion [ratio of the amount of 1-0.25 mm water-stable aggregates to the amount of structural aggregates of the same size x 100], K_Z – structure vulnerability coefficient [D_s / D_w].*

The results show that the indicators characterizing the structural state of soils in all study regions (AVA, K_{str}, D_s) can be assessed as "very good" (AVA >60%) and "good" (AVA >50%) according to the existing gradations (Table 2). Approximately the same result is obtained for all structural indicators, which indicates a high correlation between them. The high structurality of soils is most likely due to their predominantly silty clay and clay granulometric composition. Such soils are usually more resistant to mechanical impact.

The water stability of the soil structure in the study regions has a wider range of variations (Table 2). Thus, the assessment of the amount of water-stable aggregates (WSI) larger than 0.25 millimeters according to the existing gradations in the regions gives the following results: Jalilabad – mainly medium water-stable (WSI 40-60%), in some places weak (WSI 20-40%) and good (WSI 60-80%); Masalli – medium and good water-stable; Lankaran – mainly medium water-stable is observed.

In terms of assessing the degree of erosion of soils, the structure vulnerability coefficient (K_Z) is often used. K_Z reflects the general structural quality of the soil in terms of its structural-aggregate composition. The assessment of the structural quality of soils in the study areas according to the existing gradation according to KZ allows us to draw the following conclusions. In total, the structural quality of soils in 28 study areas can be assessed as follows: "very good" (K_Z <4) – 1% (Lankaran district), "good" (K_Z 4-7) – 39%, "satisfactory" (K_Z 7-10) – 36%, "unsatisfactory" (K_Z >10) – 14% (mainly in the Jalilabad district).

Agrophysical indicators of soil fertility. The results of agrophysical analyses are shown in Table 3. Overall, the agrophysical fertility indicators of the studied grain and pasture soils vary in a very wide range (W: 11.1-26.1 %, ρs: 2.3-2.61 g/cm^3, ρ_b: 0.94-1.55 g/cm^3, ε_t: 35.1-34.4 %, ε_a: 2.6-48.1 %). Spatial variability of agrophysical properties on a regional scale can be determined by a number of natural and anthropogenic factors, along with soil-climatic conditions. Assessment of agrophysical indicators of soils according to various gradations shows that there is a need to improve the physical condition of some arable land areas of the regions. Thus, in 28 research areas in different regions, the indicators characterizing the physical quality of the soil's arable layer (compaction, water-air capacity, aeration) are at an "unsatisfactory" level in 25-54% of cases: ρ_b >1.30 g/cm^3 – 39%, ε_t<50% – 54%, ε_a<15% – 25%.

Agrochemical properties of soils. The results of the agrochemical analysis are given in Table 4. As can be seen from the table, in general, the agrochemical state of the studied soils in economic region can be characterized as follows: According to the pH index, the soils were weakly acidic (36%), normal (28%) and weakly alkaline (36%), carbonated (86%) and moderately carbonated (14%), mainly (>80%) moderately humus-rich, not saline (EC1:1 < 1.0 dS . m–1), mainly (85%) very poorly and poorly

Table 3

Average values of agrophysical indicators of fertility

District	Agrophysical indicators				
	W, %	ρ_b, q/sm^3	ρ_s, q/sm^3	ε_t, %	ε_a, %
Jalilabad	19.8 (11.1-26.0)	1.20 (0.94-1.52)	2.49 (2.31-2.60)	51.6 (41.6-63.4)	27.3 (11.1-48.1)
Masalli	23.8 (21.3-26.1)	1.38 (1.23-1.55)	2.51 (2.35-2.59)	45.1 (35.1-55.7)	12.5 (2.6-28.0)
Lankaran	15.5 (14.9-16.0)	1.29 (1.19-1.48)	2.48 (2.37-2.61)	48.0 (40.7-54.2)	29.3 (18.7-36.1)

Note: *W – moisture, ρ_b – dry bulk density, ρ_s – particle density, ε_t – total porosity [100 (1 – ρ_b/ρ_s)], εa – air filled porosity [$\varepsilon_t - W\rho_b$].*

supplied with easily absorbable phosphorus, and moderately and well (50%), high and very high (40%) with potassium.

Productivity and grain quality indicators. Grain productivity and quality indicators of cereal crops in the cultivated areas by region are given in Table 5. In general, it is observed that the productivity and quality of cereal crops in the study regions are significantly dependent on soil-climatic conditions, soil properties, nutritional conditions, soil cultivation, fertilization, etc. That is, the diversity of soil fertility and cultivation technology elements leads to the diversity of plant productivity and quality. In general, the grain productivity and quality of plants also vary in a very wide range, and the grain quality mainly corresponds to class III.

In the current agroecological conditions, which are becoming more complicated by climate change, preserving soil fertility, improving its agrophysical and agrochemical properties, and obtaining high-quality crops from cereal crops depend critically on the efficient use of arable land and the elements of applied cultivation technology.

Remote sensing of land cover: NDVI and its mapping. Remote sensing data are the main sources for the analysis of ecological processes on a regional or global scale. These data have been widely used in recent decades to detect variability. Remote sensing data (e.g. Landsat and Sentinel data, Spot imagery, etc.) are very useful for visualization, classification

Table 4

Average values of agrochemical indicators

District	Agrochemical indicators						
	pH	$CaCO_3$, %	OM, %	N, %	P, mg/kg	K, mg/kg	$EC_{1:1}$, dS/m
Jalilabad	7.3 (6.1-8.0)	3.5 (1.2-9.7)	2.0 (1.2-2.8)	0.16 (0.13-0.22)	11.4 (3.7-39.2)	473 (226-1181)	0.51 (0.35-0.69)
Masalli	6.7 (6.1-7.4)	2.5 (2.1-3.5)	2.2 (1.6-2.5)	0.17 (0.13-0.20)	18.6 (4.6-32.7)	357 (118-1014)	0.36 (0.17-0.50)
Lankaran	6.2 (6.0-6.5)	2.5 (1.7-3.2)	2.4 (1.7-3.0)	0.19 (0.13-0.25)	15.8 (10.4-19.9)	336 (324-357)	0.16 (0.12-0.20)

Note: *pH – acidity (alkalinity), $CaCO_3$ – carbonation, OM – humus, N – total nitrogen, P – mobile phosphorus, K – exchangeable potassium, $EC_{1:1}$ – electrical conductivity.*

Table 5

Average values and ranges of grain yield and quality indicators of wheat

district	Y, %	Quality indicators					
		M_{1000}, g	Vi, %	Gl, %	KDI, c.g.	Se, ml	Pr, %
Jalilabad	36.1[a] 6.5-58.8[b]	35.9 19.2-45.0	61.0 16.0-90.0	28.6 19.2-36.0	101.3 87.4-111.2	20.0 12.0-33.0	12.6 9.5-15.4
Masalli	27.1 13.6-39.5	29.6 24.6-32.8	43.2 23.5-65.5	27.8 22.4-32.8	97.9 91.6-104.9	30.3 25.5-37.5	12.4 10.7-15.0
Lankaran	30.6 15.8-59.6	35.3 22.8-46.4	30.0 15.0-46.0	22.1 16.0-32.8	89.2 86.4-92.0	21.5 12.0-33.0	11.0 9.3-14.0

Note: *Y – grain yield, M_{1000} – thousand grain mass, Vi – vitreousness, Gl – gluten, GDI – gluten deformation index, Se – sedimentation, Pr – protein, [a, b] – average value and range of variation.*

and analysis of the area. These data can be classified according to their resolution, electromagnetic wave spectrum, energy source, etc. The higher the resolution of satellite data (spatial, spectral, radiometric and temporal resolution), the higher the accuracy achieved during classification.

As mentioned above, the study was conducted in the cereal fields of 28 villages and settlements covering a total of 28 coordinate points in the Lankaran-Astara area. In accordance with the field study, NDVI indices were determined and analyzed comparatively in 28 study points selected from the areas where cereal agrocenoses are located in all administrative districts (Jalilabad, Masalli, Lankaran) in April, May 2024 based on satellite images. Tables and maps showing changes in NDVI values were compiled in accordance with the results of the study. Below, the values and maps of the NDVI indices reflecting the state of cereal fields in the study area in different periods are sequentially described. For this, data from the Landsat 8 and 9 satellites covering the relevant periods were downloaded and analyzed (Figure 2-9).

Let's follow the dynamics of NDVI based on the results obtained in the Lankaran-Astara economic region. The trend of NDVI changes indicates that cereal crops are already in the full ripening phase in the Jalilabad region at the end of May and harvesting has begun. The change in the index values within 0.1-0.2 indicates that the development of vegetation has almost stopped. However, in the Lankaran and Masalli regions, harvesting is usually carried out a few days later. Thus, the difference in NDVI in April and May is very low. This indicates that the development of plants is weak. This pattern can be applied to all villages of Masalli and Lankaran regions. The results show that cereal crops are weak in the Masalli and Lankaran regions compared to Jalilabad region (Table 6).

Conclusions. Many developing countries that used to suffer from famine and hunger can now meet their nutritional needs. In accordance with the purpose of the study, in the cereal fields of 28 villages and settlements of the Jalilabad, Masalli and Lankaran administrative districts, which are included in the Lankaran-Astara economic region of the republic, in a total of 28 coordinate points, the granulometric composition of the soil layer, structural quality, agrophysical and agrochemical indicators of fertility, grain yield and quality indicators of cereal

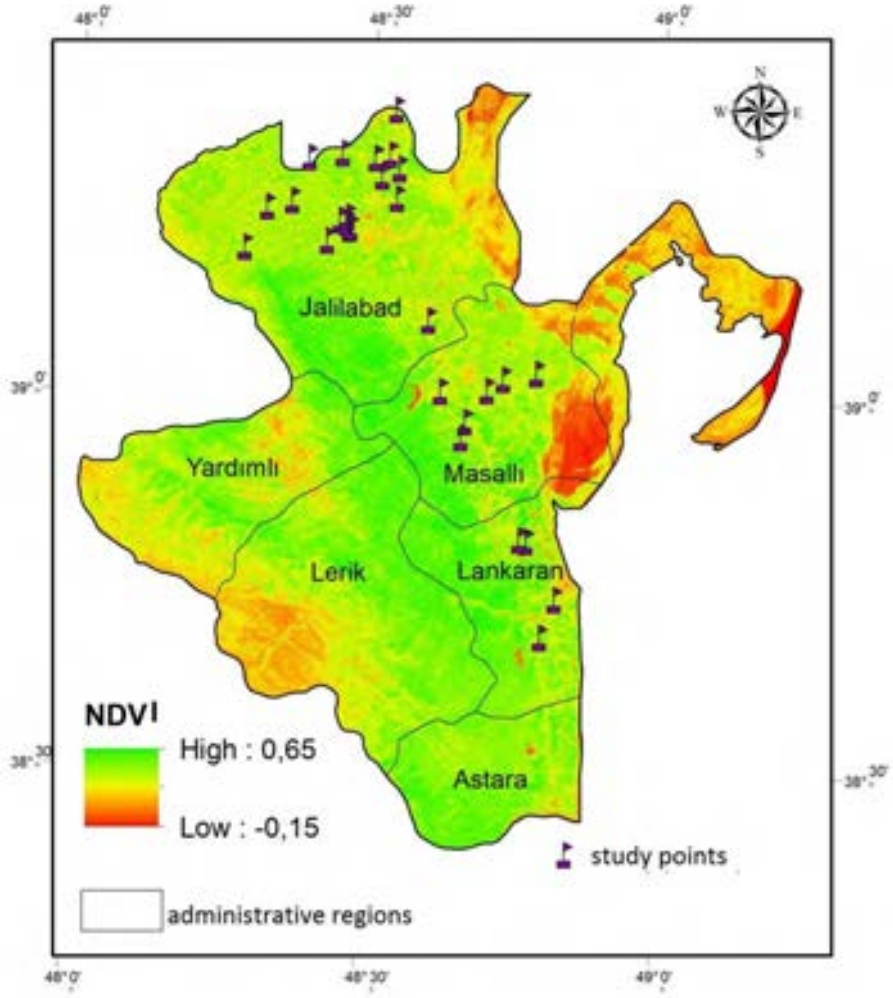


Fig. 2. Map of NDVI in the Lankaran-Astara economic region (28.04.2024)

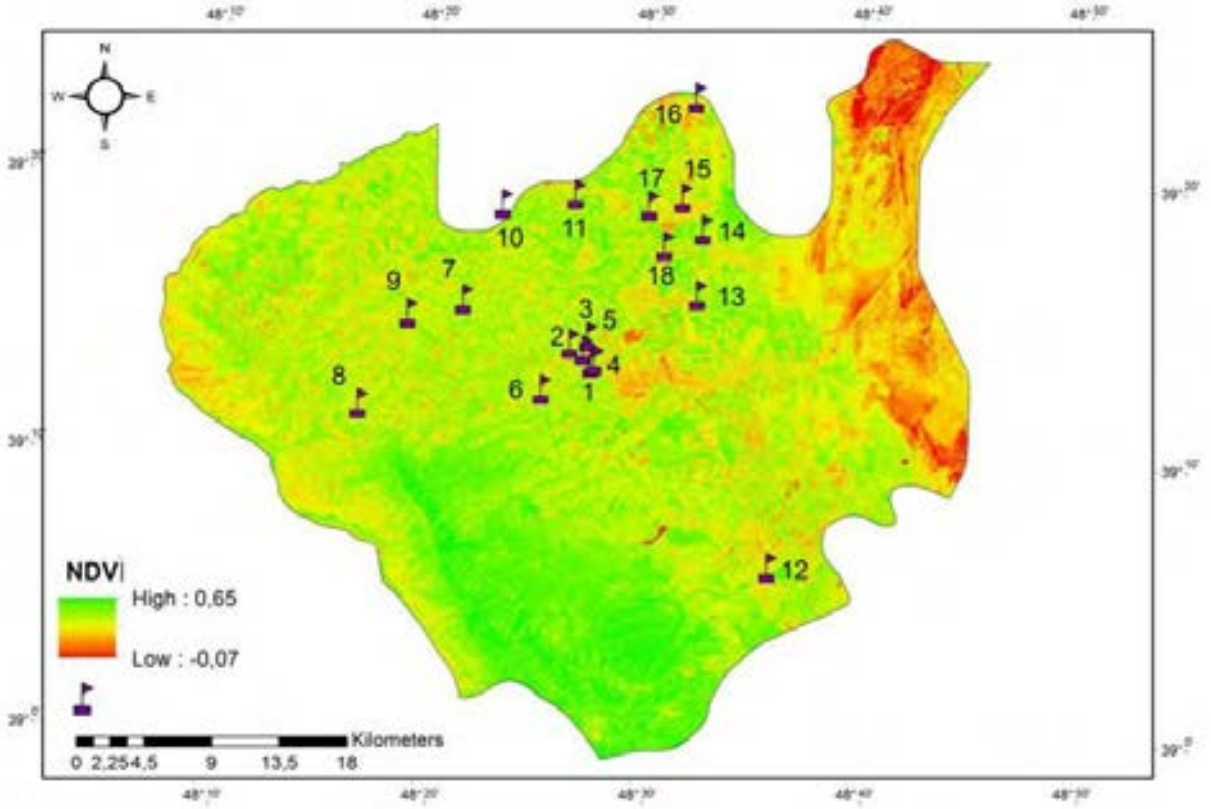


Fig. 3. Map of NDVI in the Jalilabad district (28.04.2024)

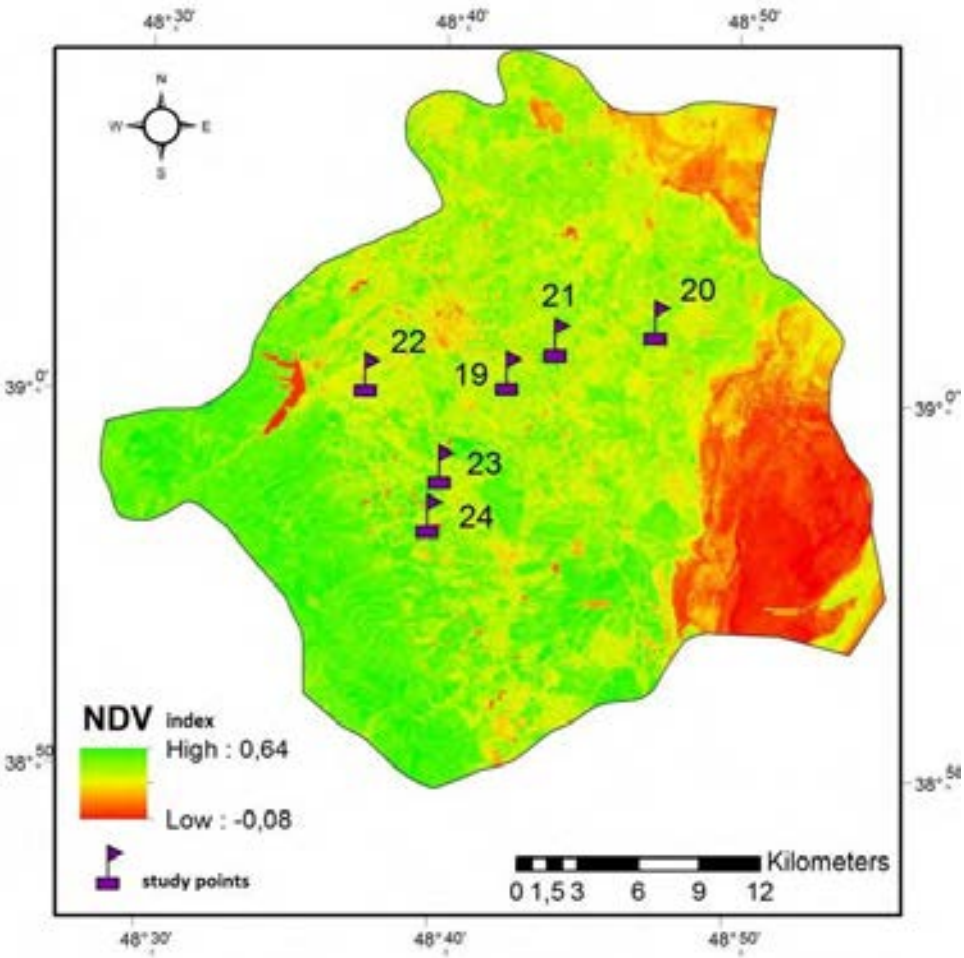


Fig. 4. Map of NDVI in the Masalli district (28.04.2024)

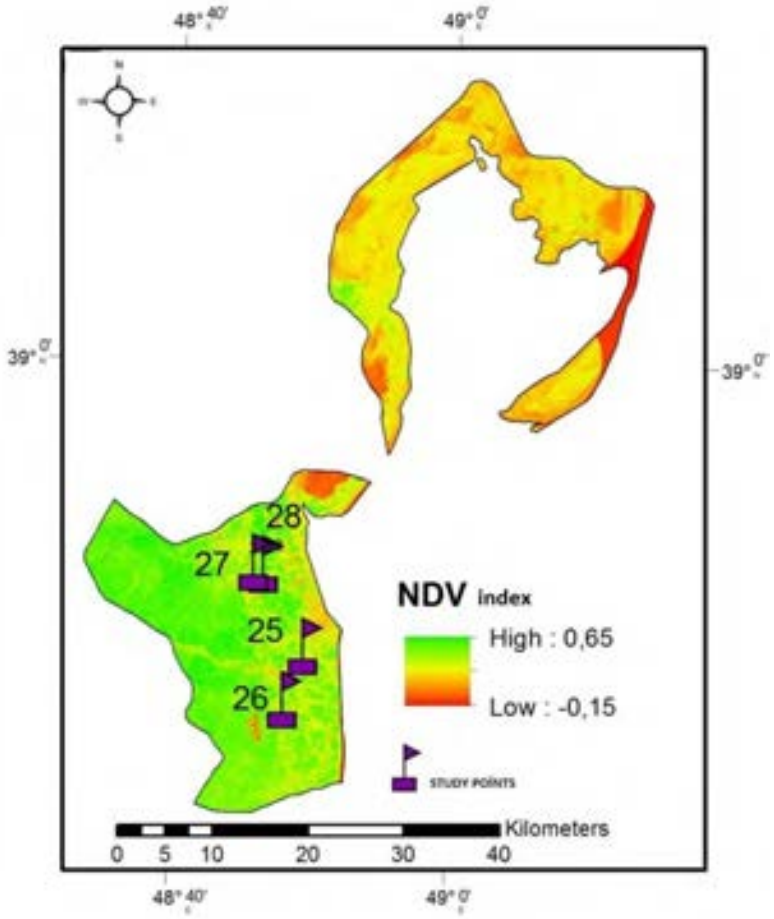


Fig. 5. Map of NDVI in the Lankaran region (28.04.2024)

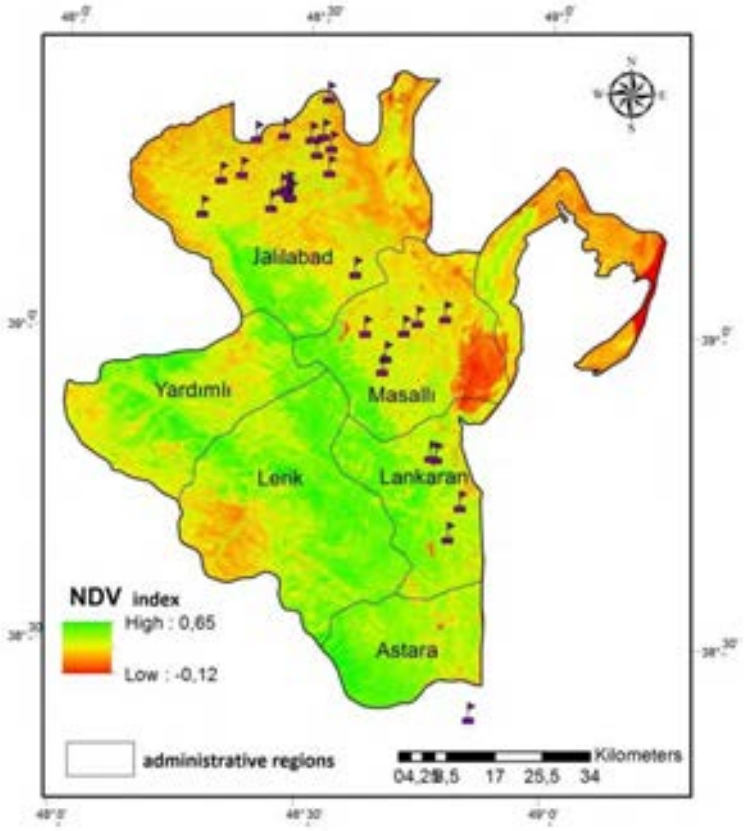


Fig. 6. Map of NDVI in the Lankaran-Astara economic region (30.05.2024)

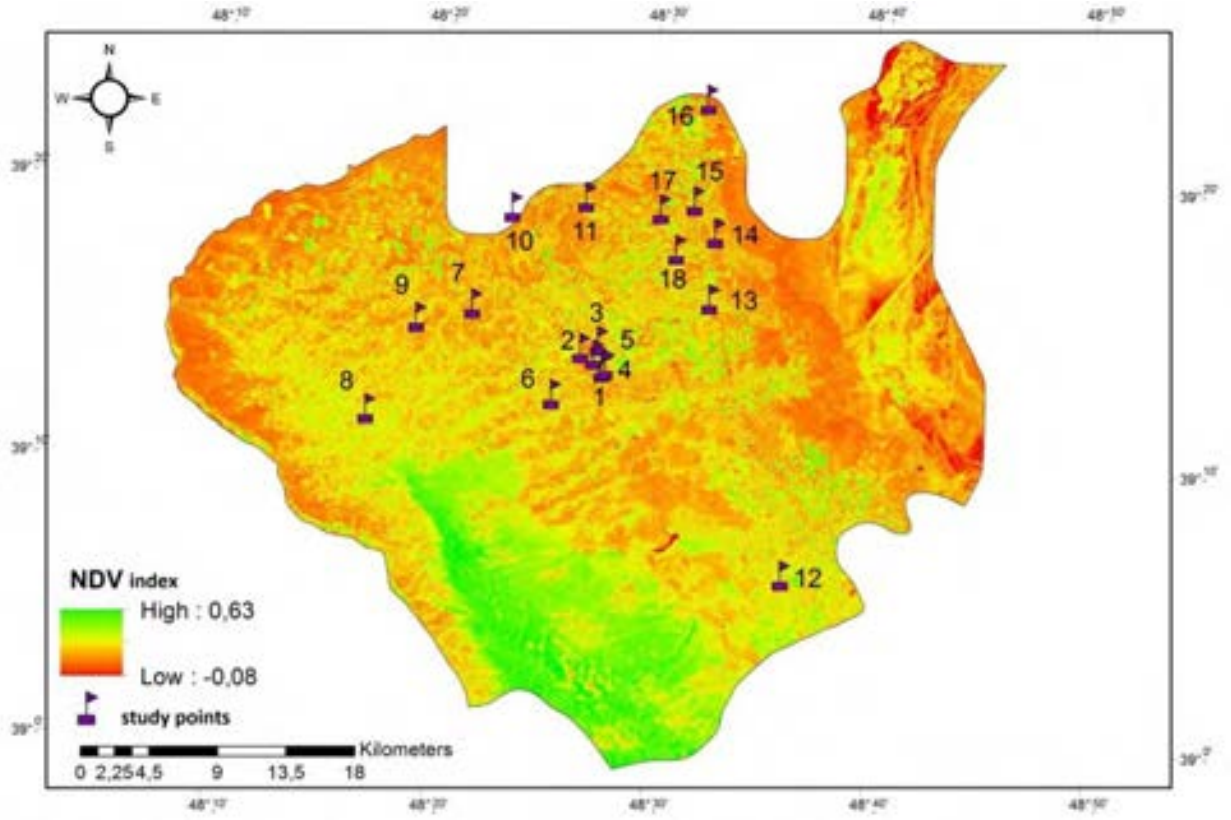


Fig. 7. Map of NDVI in the Jalilabad district (30.05.2024)

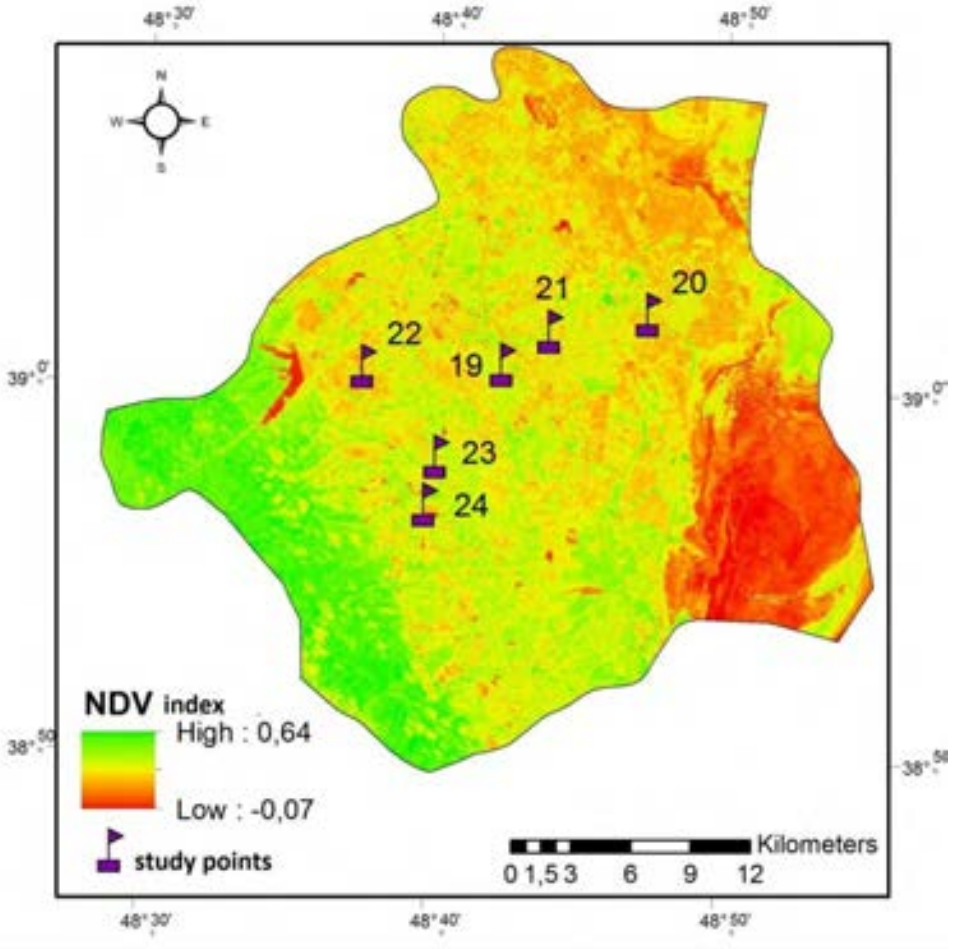


Fig. 8. Map of NDVI in the Masalli district (30.05.2024)

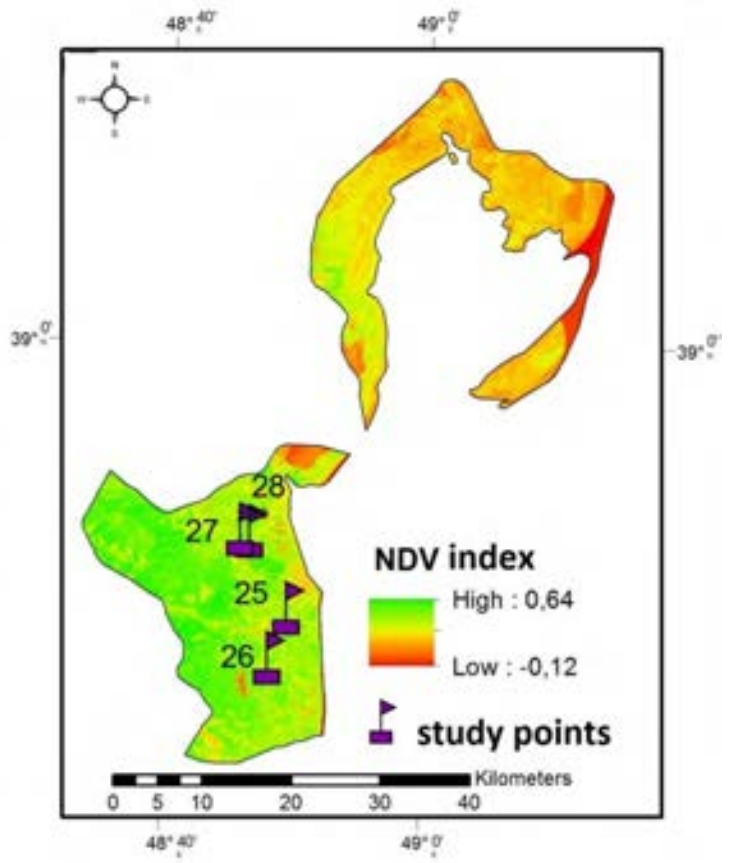


Fig. 9. Map of NDVI in the Lankaran district (30.05.2024)

Table 6

Dynamics of NDVI at survey points in the Lankaran-Astara economic region

№	Study points (village, town)	Administrative districts	NDVI values	
			April 28, 2024	May 30, 2024
1	RES 1	Jalilabad	0,3829	0,1829
2	RES 2		0,4454	0,2118
3	RES 3		0,4167	0,169
4	RES 4		0,3572	0,1767
5	RES 5		0,4581	0,2443
6	Astanli		0,4451	0,2274
7	Tekla		0,469	0,1809
8	Khanegah		0,4037	0,2838
9	Shorbachi		0,4506	0,2317
10	Babakhanli		0,4414	0,2414
11	Uchtepe		0,419	0,1891
12	Goytepe		0,447	0,2454
13	Sabirabad		0,3624	0,3107
14	Guneshli		0,4691	0,1668
15	Alar		0,4279	0,1536
16	Tazakend		0,3477	0,1416
17	Ojagli		0,4078	0,1604
18	Qarazenjir		0,3435	0,2218

Continuation of Table 6

19	Musakuche	Masalli	0,3575	0,2804
20	Huseynhajili		0,3887	0,3756
21	Gizilaghaj		0,4725	0,4175
22	Erkivan		0,3429	0,2414
23	Gizilavar		0,2341	0,211
24	Badalan		0,3713	0,2852
25	Darquba	Lankaran	0,3967	0,331
26	Mogonojoba		0,3747	0,2888
27	Girdeni		0,3764	0,2943
28	Viravul		0,463	0,3925

crops were determined. Remote sensing was carried out in the area covering different periods using the Landsat 8 satellite according to the geographical coordinates corresponding to the study, and the dynamics of vegetation indices characterizing the development of soil and plant cover were determined and mapped. In conclusion, the following can be noted:

The soils in the study areas are mainly of heavy granulometric composition, and according to the USDA classification, they are clay, silty clay, cleay loam, and silty clay loam.

The assessment of the structure vulnerability coefficient (K_Z), which is a complex indicator of the resistance of soils to mechanical impact and water impact, in the study areas shows that the structural quality of the soils is highly heterogeneous. Thus, 1% of the soils in all 28 study areas have a structural quality of "very good" (Lankaran region), 39% have "good", 36% have "satisfactory", and 14% have "unsatisfactory" (mainly in the Jalilabad region).

In general, the agrophysical quality indicators of the studied soils vary in a very wide range (W: 11.1-26.1 %, ρ_s: 2.3-2.61 g/cm^3, ρ_b: 0.94-1.55 g/cm^3, ε_t: 35.1-63.4 %, εa: 2.6-48.1 %). The high spatial variability of agrophysical properties, along with soil-climatic conditions and natural soil heterogeneity, can be caused by various anthropogenic influences in the process of land use, vegetation cover, etc. Thus, the indicators characterizing the agrophysical quality of soils (compaction, water and air capacity, aeration) in 25-50% of cases in 28 research areas in different regions are at an "unsatisfactory" level. This is manifested by ρ_b >1.30 g/cm^3 in 39% of cases, ε_t < 50 % in 54% of cases, and ε_a < 15 % in 25% of cases.

Bibliography

1. *Amanova, Sh.S., Hajiyeva, G.N. (2023). Investigation of Natural Condition in Urban Landscapes of Plain Areas Based on GIS. C. R. Acad. Bulg. Sci., 76(11), 1679-1689. https://doi.org/10.7546/CRABS.2023.11.05*
2. *Beeson, P.C., Daughtry, C.S.T., Wallander, S.A. (2020). Estimates of Conservation Tillage Practices Using Landsat Archive. Remote Sens., 12, 2665. https://doi.org/10.3390/rs12162665*
3. *Carter M.R., Gregorich E.G. Soil Sampling and Methods of Analysis (2008) / (eds). 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, 1234.*
4. *Hajiyeva, A., Hajiyeva, G., Dadashova, K. K. (2023). Landscape-ecological carcass model of urban landscape and methods of optimize urban landscapes (on the patterns of Ganja and Mingachevir cities). Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series Geology. Geography. Ecology, (59), 277-283. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-20*
5. *Гелевера, О., Мостіпан, М., Топольний, С. (2023). Зимова та весняна багаторічна динаміка температури повітря в Центральній Україні. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія: Геологія. Географія. Екологія, (59), 83–94. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-07*
6. *Hirzel, J., Paredes, M., Becerra, V., and Donoso, G. (2020). Response of direct seeded rice to increasing rates of nitrogen, phosphorus, and potassium in two paddy rice soils. Chilean Journal of Agricultural Research, 80, 263-273. https://doi.org/10.4067/S0718-58392020000200263*
7. *Hümmətov, N. Q. (2020). Torpaq-ekoloji mühitin fiziki xüsusiyyətlərinin tənzimlənməsinin torpaq sağlamlığının və bitki məhsuldarlığının yaxşılaşdırılmasında rolu. Torpaqşünaslıq və Aqrokimya İnstitutunun elmi əsərləri toplusu, 2(31), 9–38.*
8. *Ибрагимова, Л. П., Наджафов, Д. С., Асадов, Х. Б. (2020). Деградация почв и пути её оптимизации в Нахчыванской АР. Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле, (4), 3–11.*
9. *Jafarova, F.M., Hajiyeva, A.Z. (2024). Modern situation and prospects of the use of biotechnologies in the development of Azerbaijan's agriculture. Revista Universidad Y Sociedad, (4), 303-310.*

10. Jiménez-Lao, R., Aguilar, F.J., Nemmaoui, A., Aguilar, M.A. (2020). Remote Sensing of Agricultural Greenhouses and Plastic-Mulched Farmland: An Analysis of Worldwide Research. Remote Sens., 12, 2649. https://doi.org/10.3390/rs12162649
11. Крайнюк, О., Буц, Ю., Барбашин, В., Нікітченко, О., & Сухов, В. (2024). Деградація екосистем у Харківській області під час війни: супутниковий аналіз. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (61), 329-343. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-26
12. Lee, K., Sung, H.C., Seo, J.-Y., Yoo, Y., Kim, Y., Kook, J.H., Jeon, S.W. (2020). The Integration of Remote Sensing and Field Surveys to Detect Ecologically Damaged Areas for Restoration in South Korea. Remote Sens., 12, 3687. https://doi.org/10.3390/rs12223687
13. Li, D., Zhang, P., Chen, T., Qin, W. (2020). Recent Development and Challenges in Spectroscopy and Machine Vision Technologies for Crop Nitrogen Diagnosis: A Review. Remote Sens., 12, 2578. https://doi.org/10.3390/rs12162578
14. Lu, B., Dao, P.D., Liu, J., He, Y., Shang, J. (2020). Recent Advances of Hyperspectral Imaging Technology and Applications in Agriculture. Remote Sens., 12, 2659. https://doi.org/10.3390/rs12162659
15. Mo, N., Yan, L. (2020). Improved Faster RCNN Based on Feature Amplification and Oversampling Data Augmentation for Oriented Vehicle Detection in Aerial Images. Remote Sens., 12, 2558. https://doi.org/10.3390/rs12162558
16. Nedd R, Light K, Owens M, James N, Johnson E, Anandhi A. A (2021). Synthesis of Land Use/Land Cover Studies: Definitions, Classification Systems, Meta-Studies, Challenges and Knowledge Gaps on a Global Landscape. Land., 10(9), 994. https://doi.org/10.3390/land10090994
17. Petrenko L.R., Berezhnyak Ye.M. (2008). Soil Science: Practical Methods Manual. NAU Publishing house, Kyiv, 239.
18. Segarra, J., Buchaillot, M.L., Araus, J.L., Kefauver, S.C. (2020). Remote Sensing for Precision Agriculture: Sentinel-2 Improved Features and Applications. Agronomy, 10, 641. https://doi.org/10.3390/agronomy1005064
19. Sewa R., Sunil K., Gupta O.P. (Laboratory Manual on Protocols for Evaluation of Wheat Quality (2023). ICAR-Indian IW&B Research, Karnal 132001, Haryana (India), 36.
20. Sishodia, R.P., Ray, R.L., Singh, S.K. (2020). Applications of Remote Sensing in Precision Agriculture: A Review. Remote Sens., 12, 3136. https://doi.org/10.3390/rs12193136
21. Sustainable Development Goals by the United Nations. https://www.undp.org/ukraine/sustainable-development-goals/zero-hunger
22. Vlachopoulos, O., Leblon, B., Wang, J., Haddadi, A., LaRocque, A., Patterson, G. (2020). Delineation of Crop Field Areas and Boundaries from UAS Imagery Using PBIA and GEOBIA with Random Forest Classification. Remote Sens., 12, 2640. https://doi.org/10.3390/rs12162640
23. Wang Q., Li J., Jin T., Chang X., Zhu Y., Li Y., Sun J., Li D. (2020). Comparative analysis of Landsat-8, Sentinel-2 and GF-1 data for retrieving soil moisture over wheat farmlands. Remote Sensing, 12, 2708.
24. Zhou, X., Zhang, J., Chen, D., Huang, Y., Kong, W., Yuan, L., Ye, H., Huang, W. (2020). Assessment of Leaf Chlorophyll Content Models for Winter Wheat Using Landsat-8 Multispectral Remote Sensing Data. Remote Sens., 12, 2574. https://doi.org/10.3390/rs12162574

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

References

1. Amanova, Sh.S., Hajiyeva, G.N. (2023). Investigation of Natural Condition in Urban Landscapes of Plain Areas Based on GIS. C. R. Acad. Bulg. Sci., 76(11), 1679-1689. https://doi.org/10.7546/CRABS.2023.11.05
2. Beeson, P.C., Daughtry, C.S.T., Wallander, S.A. (2020). Estimates of Conservation Tillage Practices Using Landsat Archive. Remote Sens., 12, 2665. https://doi.org/10.3390/rs12162665
3. Carter M.R., Gregorich E.G. Soil Sampling and Methods of Analysis (2008) (eds). 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, 1234.
4. Hajiyeva, A., Hajiyeva, G., Dadashova, K. K. (2023). Landscape-ecological carcass model of urban landscape and methods of optimize urban landscapes (on the patterns of Ganja and Mingachevir cities). Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series Geology. Geography. Ecology, (59), 277-283. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-20
5. Helevera, O., Mostipan, M., Topolnyi, S. (2023). Winter and spring long-term dynamic of air temperature in Central Ukraine. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series Geology. Geography. Ecology, (59), 83-94. [in Ukrainian] https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-07 [in Ukrainian]
6. Hirzel, J., Paredes, M., Becerra, V., and Donoso, G. (2020). Response of direct seeded rice to increasing rates of nitrogen, phosphorus, and potassium in two paddy rice soils. Chilean Journal of Agricultural Research, 80, 263-273. https://doi.org/10.4067/S0718-58392020000200263
7. Hummatov, N.G. (2020). The role of regulating the physical properties of the soil-ecological environment in improving soil health and plant productivity. Collection of scientific works of the Institute of Soil Science and Technology, 2 (31), 9-38. [in Azerbaijani]

8. Ibrahimova, L.P., Najafov, J.S., Asadov, H.B. (2020). Soil degradation and its optimization in Nakhchivan AR. Proceedings of Tula State University, Earth Sciences, (4), 3-11.
9. Jafarova, F.M., Hajiyeva, A.Z. (2024). Modern situation and prospects of the use of biotechnologies in the development of Azerbaijan's agriculture. Revista Universidad Y Sociedad, (4), 303-310.
10. Jiménez-Lao, R., Aguilar, F.J., Nemmaoui, A., Aguilar, M.A. (2020). Remote Sensing of Agricultural Greenhouses and Plastic-Mulched Farmland: An Analysis of Worldwide Research. Remote Sens., 12, 2649. https://doi.org/10.3390/rs12162649
11. Krainiuk, O., Buts, Y., Barbashyn, V., Nikitchenko, O., Sukhov, V. (2024). Ecosystem degradation in Kharkiv region during the war: satellite analysis. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series Geology. Geography. Ecology, (61), 329-343. [in Ukrainian] https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-26 [in Ukrainian]
12. Lee, K., Sung, H.C., Seo, J.-Y., Yoo, Y., Kim, Y., Kook, J.H., Jeon, S.W. (2020). The Integration of Remote Sensing and Field Surveys to Detect Ecologically Damaged Areas for Restoration in South Korea. Remote Sens., 12, 3687. https://doi.org/10.3390/rs12223687
13. Li, D., Zhang, P., Chen, T., Qin, W. (2020). Recent Development and Challenges in Spectroscopy and Machine Vision Technologies for Crop Nitrogen Diagnosis: A Review. Remote Sens., 12, 2578. https://doi.org/10.3390/rs12162578
14. Lu, B., Dao, P.D., Liu, J., He, Y., Shang, J. (2020). Recent Advances of Hyperspectral Imaging Technology and Applications in Agriculture. Remote Sens., 12, 2659. https://doi.org/10.3390/rs12162659
15. Mo, N., Yan, L. (2020). Improved Faster RCNN Based on Feature Amplification and Oversampling Data Augmentation for Oriented Vehicle Detection in Aerial Images. Remote Sens., 12, 2558. https://doi.org/10.3390/rs12162558
16. Nedd R, Light K, Owens M, James N, Johnson E, Anandhi A. A (2021). Synthesis of Land Use/Land Cover Studies: Definitions, Classification Systems, Meta-Studies, Challenges and Knowledge Gaps on a Global Landscape. Land., 10(9), 994. https://doi.org/10.3390/land10090994
17. Petrenko L.R., Berezhnyak Ye.M. (2008). Soil Science: Practical Methods Manual. NAU Publishing house, Kyiv, 239.
18. Segarra, J., Buchaillot, M.L., Araus, J.L., Kefauver, S.C. (2020). Remote Sensing for Precision Agriculture: Sentinel-2 Improved Features and Applications. Agronomy, 10, 641. https://doi.org/10.3390/agronomy1005064
19. Sewa R., Sunil K., Gupta O.P. (Laboratory Manual on Protocols for Evaluation of Wheat Quality (2023). ICAR-Indian IW&B Research, Karnal 132001, Haryana (India), 36.
20. Sishodia, R.P., Ray, R.L., Singh, S.K. (2020). Applications of Remote Sensing in Precision Agriculture: A Review. Remote Sens., 12, 3136. https://doi.org/10.3390/rs12193136
21. Sustainable Development Goals by the United Nations. https://www.undp.org/ukraine/sustainable-development-goals/zero-hunger
22. Vlachopoulos, O., Leblon, B., Wang, J., Haddadi, A., LaRocque, A., Patterson, G. (2020). Delineation of Crop Field Areas and Boundaries from UAS Imagery Using PBIA and GEOBIA with Random Forest Classification. Remote Sens., 12, 2640. https://doi.org/10.3390/rs12162640
23. Wang Q., Li J., Jin T., Chang X., Zhu Y., Li Y., Sun J., Li D. (2020). Comparative analysis of Landsat-8, Sentinel-2 and GF-1 data for retrieving soil moisture over wheat farmlands. Remote Sensing, 12, 2708.
24. Zhou, X., Zhang, J., Chen, D., Huang, Y., Kong, W., Yuan, L., Ye, H., Huang, W. (2020). Assessment of Leaf Chlorophyll Content Models for Winter Wheat Using Landsat-8 Multispectral Remote Sensing Data. Remote Sens., 12, 2574. https://doi.org/10.3390/rs12162574

Вивчення природно-екологічних умов в агроландшафтах на основі польових досліджень та дистанційного зондування

Нізамі Гумматов [1]
д. філософії (біологія), доцент, Лабораторія аналізу ґрунтів та рослин,
[1] Науково-дослідний інститут рослинництва, Баку, Азербайджан;
Шахназ Аманова [2,3]
к. геогр. н., викладач,
[2] Бакинський державний університет,
факультет екології та ґрунтознавства, Баку, Азербайджан;
[3] Хазарський університет,
кафедра географії та навколишнього середовища, Баку, Азербайджан;
Асмар Ахмадова [1]
д. філософії (с.-г.), Лабораторія аналізу ґрунтів та рослин,
Ульвія Ісгандарова [4]
д. філософії (географія), ст. викладач, кафедра географії,
[4] Нахчиванський державний університет, Нахчиван, Азербайджан

В умовах зміни клімату природні та антропогенні фактори, пов'язані з діяльністю людини, призводять до деградації ґрунтового покриву, що призводить до зниження родючості ґрунту та продуктивності екосистем,

погіршення соціально-економічної якості життя людини та загалом створює серйозні проблеми в продовольчій безпеці країни. Неврахування агрофізичних, агрохімічних, фізико-хімічних та інших властивостей ґрунтів у землекористуванні, залежно від агроекологічних умов, призводить до деградації сільськогосподарських угідь та проявляється у вигляді засолення ґрунту, механічної деформації та ущільнення, ерозії, опустелювання, зниження продуктивності екосистем та інших форм. Тому в умовах інтенсивного землекористування управління продуктивністю агроценозів тією чи іншою мірою залежить від оцінки агрофізичного та агрохімічного стану ґрунтів, що відіграє вирішальну роль у виявленні та контролі деградації та внесенні пропозицій щодо вирішення цієї проблеми. Дослідження проводилося на зернових культурах Ленкоран-Астарського (Джалілабадського, Масаллинського, Ленкоранського) економічного району Азербайджанської Республіки в умовах богарного зрошення з різним ступенем зволоження. Дослідження охоплювало зернові поля, розташовані в різних сільських районах адміністративних областей, а також ділянки, що охоплюють зернові посіви Джалілабадської регіональної дослідної станції (РДС) Науково-дослідного інституту рослинництва. Відповідно до методики, дослідження проводилися у відповідних відділах та лабораторіях Науково-дослідного інституту рослинництва з використанням космічних (ГІС-технології, дистанційне зондування Землі) та наземних (агрофізичні та агрохімічні властивості ґрунту, показники врожайності та якості зерна) методів. З точки зору оцінки ступеня ерозії ґрунтів часто використовується коефіцієнт структурної вразливості (КВ). КВ відображає загальну структурну якість ґрунту з точки зору його структурно-агрегатного складу. Структурна деградація може призвести до ущільнення та утворення кірки на поверхні ґрунту, що знижує швидкість інфільтрації води, збільшує ризик ерозії ґрунту та втрати верхнього шару ґрунту. Результати показують, що показники, що характеризують структурний стан ґрунтів у всіх досліджуваних регіонах (AVA, Kstr, Ds), можна оцінити як «дуже добрий» (AVA >60%) та «добрий» (AVA >50%) відповідно до існуючих градацій.

***Ключові слова**: нульовий голод, дистанційне зондування, стале сільське господарство, зернові культури, знімки Landsat, продовольча безпека, оцінка врожайності сільськогосподарських культур, кліматично розумне сільське господарство, NDVI.*

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу
Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 31 березня 2025 р.
Прийнята 9 травня 2025 р.

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-13
UDC 911.3:316.42
Received 17 October 2025
Accepted 18 November 2025

Assessment of the quality of life of the population in Azerbaijan (on the example of the Greater Caucasus)

Turana Huseynova
PhD (Geography), Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan,
Institute of Geography, Baku, Azerbaijan,
e-mail: turanahuseynova.geoph@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-5876-0692

ABSTRACT

Problem definition. Improving the quality of life of the population is a priority task in solving the socio-economic development problems of countries. In ensuring socio-economic development, it is of great importance to investigate and identify the issues related to the quality of life of the population, as well as to determine the directions for addressing these issues. One of the key conditions for solving these problems is the extensive use of comprehensive assessment methods.

Formulation of the purpose. The study was conducted with the aim of assessing the quality of life of the population in the administrative districts of the Greater Caucasus region, identifying regional disparities, and proposing solutions to address them.

Research methods. The study of changes in the quality of life indicators of the population in the Greater Caucasus region, the examination of the socio-economic conditions and demographic issues of the population, as well as efforts to address them, were carried out using system-structural, comparative analysis, geographic modeling, and cartographic methods (ArcGIS software) for transferring the collected data onto maps. During the mathematical-statistical calculations, MS Excel and its processing tools such as Xlstat were utilized. In the research, while assessing the quality of life of the population, indicators were indexed by taking into account demographic, economic, social, and environmental factors. In this study, the author proposes the calculation of a Quality of Life Index (QLI) to measure the quality of life of the population or the overall development level of regions.

The main material. For the assessment of the quality of life of the population, four groups of indicators have been identified: demographic, economic, social, and environmental. In the study, the author proposed the calculation of the Quality of Life Index (QLI) to measure the overall development level of the population or regions. The Quality of Life Index is calculated as the geometric mean of four indices (demographic, economic, social, and environmental). The comparative assessment of the quality of life using indexing has been carried out for the first time in the region. When calculating the index, various indicators are taken into account. Each of these indicators has a specific weight, which varies according to the characteristics of the indicators. The main purpose of indexing is to standardize the indicators in order to compare regions.

Conclusions. The analysis revealed that the weights of the indices are variable. This variability depends on the geographical location, area, level of socio-economic development, population size, and settlement patterns of the regions. The Quality of Life Index was normalized to a range between 0 and 1, where a value of '1' indicates the region with the highest quality of life compared to others, and '0' represents the region with the lowest. The index values were grouped as follows: low (0.100–0.399), medium (0.400–0.599), high (0.600–0.899), and very high (0.900–1.000).

Keywords*: Greater Caucasus region, quality of life of the population, Quality of Life Index, demographic indicators, socio-economic indicators, environmental indicators, regional disparities.*

In cites: Huseynova Turana (2025). Assessment of the quality of life of the population in Azerbaijan (on the example of the Greater Caucasus). *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 172-183. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-13

Problem definition. Quality of life is a complex concept that serves as a criterion for the extent to which individuals are able to meet their needs. In a broader sense, it is determined by the changing nature of personal needs over time, the level of development, and the cost and quality of services used to satisfy those needs [24]. At present, there are various internationally recognized standards and indicators used to define quality of life across the world. These indicators are characterized by a range of attributes: general and personal, quantitative and qualitative, economic and socio-demographic, among others [17, 25]. It is impossible to develop a methodology that comprehensively covers the indicators characterizing quality of life while simultaneously being applicable to every country. This is due to the uneven opportunities for socio-economic development, the diversity of natural resources, the influence of geographical location, the level of development, national values, and differences in ecological conditions. The quality of life of the population in each region is determined by the state of the natural environment, health indicators, the level of economic development, and technological capacity. A high quality of life is the result of both material and spiritual development [28]. Thus, quality of life implies that the population is provided with quality services, taking into account not only statistical figures but also individuals' own perceptions regarding favorable living conditions, comfort, and the state of their environment. Such an approach may differ completely among people due to their worldview, outlook on life, and other characteristic features.

Analysis of recent research. The study of quality of life, as one of the main directions of political and economic geography, requires a comprehensive assessment of people's living standards,

© *Huseynova Turana, 2025*

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

socio-economic conditions, and interactions with the environment. Over the past decades, both international and local researchers have examined various aspects of this issue and contributed valuable insights to the field. The concept of quality of life encompasses economic, social, ecological, and demographic factors, which makes research in this area multidimensional. In this context, the Human Development Index (HDI) introduced by the United Nations Development Programme (UNDP) is considered one of the key indicators for comparing living standards across countries [30]. International studies have addressed different dimensions of quality of life. D.F.Cella (1994) proposed several models for measuring quality of life and emphasized the importance of assessing subjective well-being. R.Luiz (2008) and C.F.Alfredo (2008) conducted empirical analyses of the relationship between regional socio-economic development levels and living standards, particularly focusing on rural populations. P.Evelina (2009) and K.Nick (2009) modelled the relationships among economic welfare, income levels, and life satisfaction, and systematized the role of social indicators such as education, healthcare, and employment in shaping quality of life. K. Rusen (2012) investigated the influence of environmental factors on public health and overall well-being.

Among Azerbaijani researchers, A.N. Muradov (2007) examined the impact of regional socio-economic development indicators on population welfare. U.K. Alakbarov (2013) analysed the relationship between sustainable human development, the environment, and living standards. J.B. Guliyev (2014) explored the socio-economic challenges associated with improving living standards and quality of life.

Other studies in Azerbaijan focus mainly on regional development, demographic processes, and socio-economic conditions. Sh.M. Muradov (2004) assessed the effects of demographic changes on settlement patterns and the socio-economic environment. Z.N. Eminov (2010) evaluated demographic trends, regional development potential, and the socio-economic consequences of migration processes. N.A. Pashayev (2010) and E.S. Badalov (2016) analysed interregional socio-economic disparities and conducted comprehensive assessments of socio-economic development indicators. Z.T. Imrani (2021) and Sh.I. Mammadova (2021) carried out complex analyses of the socio-economic development directions of regions and the existing environmental challenges. R.N. Karimov (2022), G.R. Agakishiyeva (2022), and S.I. Rzayeva (2022) evaluated factors such as regional economic potential, industrial activity, population distribution, and infrastructure development, emphasizing the need to align these factors with sustainable development principles, and analysed regional development issues using modern methodological approaches.

Overall, the research reviewed indicates that assessing quality of life requires a multidisciplinary approach, and the integrated analysis of economic, social, ecological, and demographic factors constitutes one of the key methodological directions in this field.

Formulation of the purpose. The main objective of this research is to assess the quality of life of the population in the Greater Caucasus region, to identify the interrelation between relevant indicators, and to reveal the regional disparities associated with these factors.

Research methods. The analyses conducted in this research are of significant importance in terms of studying the quality of life of the population in Azerbaijan, identifying the influencing factors, and comparing the findings across administrative districts. In the theoretical part of the study, data were collected and analyzed based on both international and local literature. Additionally, the United Nations Human Development Reports and global reports on quality of life and the Human Development Index (HDI) were used as primary sources of information. Statistical data for the research were obtained from the materials of the State Statistical Committee of the Republic of Azerbaijan.

During the implementation of the research, system-structural, comparative analysis, and mathematical-statistical methods were employed to analyze information on the socio-economic situation of the region and to study demographic indicators. To examine and address socio-economic, ecological, and demographic problems, a development model was applied, and cartographic methods (using ArcGIS software) were used to visualize the obtained data on maps. In the process of mathematical-statistical calculations, software tools such as MS Excel and its XLStat extension were utilized for data processing.

In the research, while assessing the quality of life of the population, indicators were indexed by taking into account demographic, economic, social, and environmental factors. To calculate the index, the maximum (x_{max}), minimum (x_{min}), and actual (x_i) values of each indicator are used (Formula 1). The following formulas are applied to convert any given xxx indicator into an index: [30]:

$$I=\frac{X_i-X_{min}}{X_{max}-X_{min}} \quad \text{or} \quad I=\frac{X_{max}-X_i}{X_{max}-X_{min}} \qquad (1)$$

The formulas are intended for the calculation of positive and negative indicators, respectively, and the standardized values fall within the range of (0;1). Each equation is designed for a single indicator. If

there are multiple factors, the arithmetic mean of their individual indices should be calculated separately.

Thus, by summarizing the above, four groups of indicators can be identified for assessing the quality of life: demographic, economic, social, and environmental. In this study, the author proposes the calculation of a Quality of Life Index (QLI) to measure the quality of life of the population or the overall development level of regions. The Quality of Life Index is calculated as the geometric mean of four indices (demographic, economic, social, and ecological) (Formula 2).

$$QLI = \sqrt[4]{I_d \times I_e \times I_s \times I_{eco}} \quad (2)$$

here,

QLI – quality of life index,

I_d – demographic index,

I_e – economic indicators index,

I_s – social indicators index,

I_{eco} – is an index of environmental indicators.

The regions of the country differ significantly in terms of socio-economic development levels and environmental quality. For example, a city with a high level of socio-economic development may exhibit low environmental quality, or vice versa. Therefore, to more accurately assess the impact of both aspects, it is more appropriate to calculate ecological and socio-economic indicators separately.

To emphasize the importance of ecological indicators in the development level of a region, the methodology for calculating ecological indicators within the Human Development Index has been applied [27]. The main purpose of calculating the ecological index separately is to analyze the impact of ecological factors on regional development dynamics. This approach makes it possible to more clearly observe the relationship between ecological factors and human development. At the same time, it facilitates the formulation of relevant development strategies in this field. The integration of ecological indicators is essential not only for economic and social development but also for ensuring the sustainability of ecosystems.

Demographic, economic, and social indicators were indexed, and their geometric mean was calculated to obtain the Quality of Life Index (QLI) (Formula 3). Considering ecological indicators as well, the Quality of Life Index with ecological factors (QLI_{eco}) (Formula 4) was proposed using the following formulas:

$$QLI = \sqrt[3]{I_d \times I_e \times I_s} \quad (3)$$

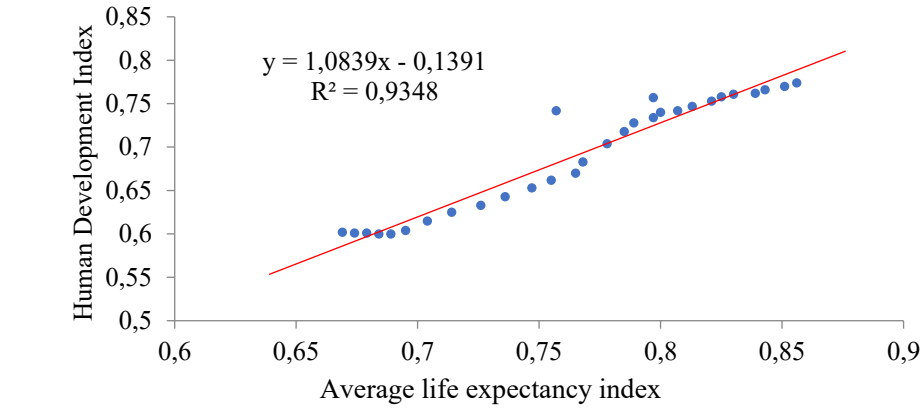
$$QLI_{eco} = 1/4(3 \times QLI + I_{eco}) \quad (4)$$

The Quality of Life Index is normalized within the range of (0;1). A value of "1" indicates that the region has the best quality of life compared to other regions, while "0" represents the worst indicators. The index values are grouped into four categories: low (0.100-0.399), medium (0.400-0.599), high (0.600-0.899), and very high (0.900-1.00).

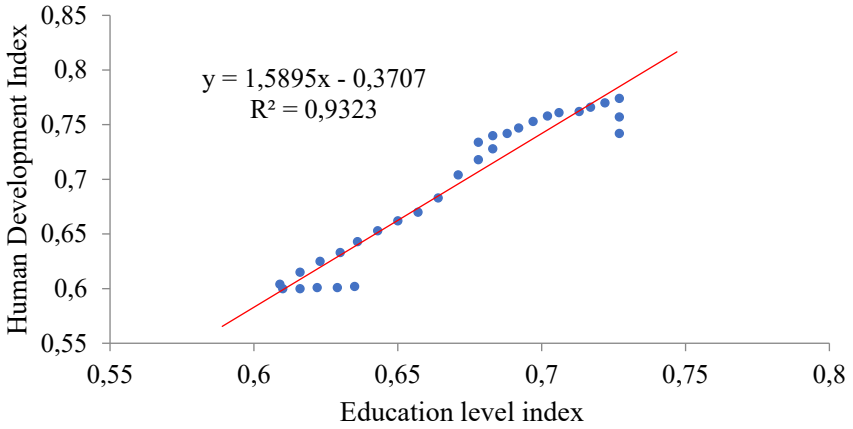
The main material. The quality of life of the population and its individual components form the foundation of a country's socio-economic development. The regulation and development of human potential is a strategically important function of the state at both national and regional levels. The significant progress achieved in improving the standard of living in Azerbaijan over the past decade has been made possible through the implementation of several key state programs. After gaining independence, the Republic of Azerbaijan was included among the countries comparable in terms of human development. Since 1993, Azerbaijan's performance has been reflected in the ranking tables of the UN's global Human Development Reports, based on various indicators [29]. Moreover, Azerbaijan's first National Human Development Report, based on data from 1992, was published in 1995. The "Globaldatalab" (Global Data Laboratory) project, created with the support of the European Research Council, provides Human Development Index data for 186 countries and their 1,783 regions [29]. For Azerbaijan's economic regions, indicators for health, education, and standard of living indices-as well as the composite Human Development Index-are available from 1995 to 2022. From this database, data were obtained for the research area including the economic regions of Baku, Absheron-Khizi, Shaki-Zagatala, Guba-Khachmaz, and Mountainous Shirvan [29]. Azerbaijan's Human Development Index increased by 11.4% from 1995 to 2005, by 10.4% from 2005 to 2010, and by 2.2% from 2015 to 2022. In the Greater Caucasus region, respective increases of 11.6%, 10.4%, and 4.0% were observed [10].

Since the indicators shaping quality of life and the emerging problems ultimately contribute to the development of the human factor, it is essential to assess the Human Development Index (HDI) in the region. Quality of life is influenced by factors such as life expectancy, maternal and infant mortality, and a complex interplay of health, education, income, safety, and environmental conditions. These indicators are, to a certain extent, interdependent. To analyze the relationships or dependencies among them, linear regression and correlation methods are widely used. These methods allow for evaluating the degree of dependency between indicators. The values of the correlation coefficient range from -1 to +1; the closer the value is to ±1, the stronger the relationship. The coefficient of determination (R^2) is a statistical measure that indicates how well the regression model explains the variation in the dependent variable(s) [17]. The interdependence of the

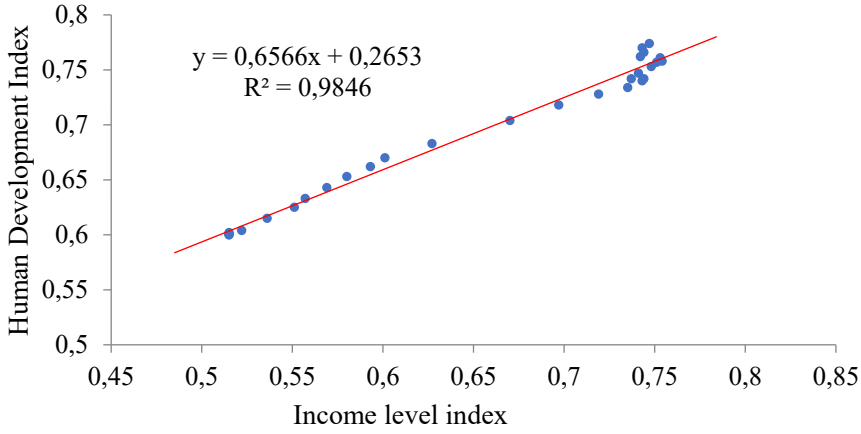
Human Development Index with life expectancy, education, and income levels has been analyzed, and the indicator most strongly influencing the HDI has been identified (Graph 1, a, b, c).



a)



b)



c)

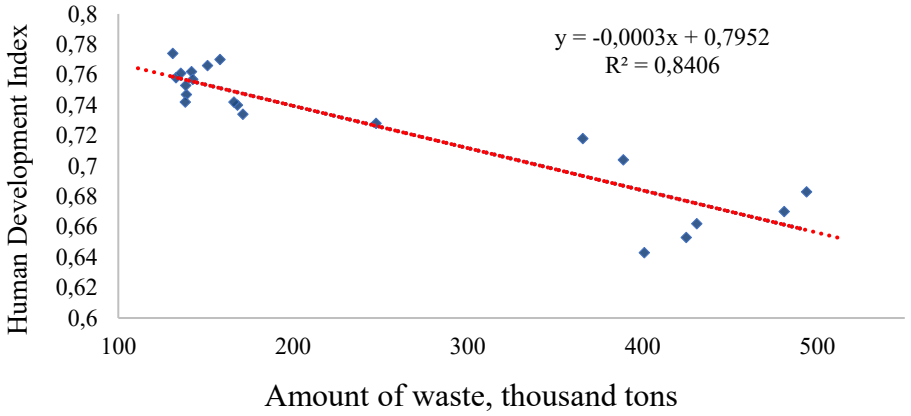
Graph 1. Dependence of the Human Development Index on life expectancy, education, and income level indices (*Source:* Charts compiled by the author based on data from the Global Data Laboratory [29])

It has been determined that the Human Development Index (HDI) depends more on income level than on the other factors. Specifically, the correlation coefficients are 0.967, 0.965, and 0.992, respectively. Correspondingly, the coefficients of determination (R^2) are 0.935, 0.932, and 0.985. This indicates that the derived regression equation is statistically significant based on the data and is suitable for forecasting. Increases in life expectancy, education level, and income level explain approximately 94%, 93%, and 99% of the variation in the Human Development Index, respectively.

Another critical factor affecting quality of life is the environment. Humans have always been dependent on their environment. Nature has historically and continues to be a fundamental factor ensuring human survival and development. The environment serves as the primary source that meets the biologi-

cal and socio-economic needs of people. Evaluating the quality of the environment is one of the essential conditions for its effective management [11, 13]. Improper and unsafe waste disposal leads to the contamination of soil and water resources, increases epidemiological risks, and consequently deteriorates the quality of life. The emergence of diseases due to the adverse environmental effects of waste is a significant public health problem. Regardless of the proper management or disposal of waste, it can pose various environmental and health risks. These include water pollution, pathogens, chemical contaminants, soil pollution, heavy metal contamination, air pollution, waste incineration, landfill gases, direct contact and injury, and hazardous waste exposure. The negative impact of waste on the environment is a complex issue and can lead to a wide range of diseases. Efficient waste management and preventive measures are crucial for protecting public health and the environment.

Waste negatively impacts environmental quality and, consequently, affects the quality of life. It has been established that a reduction in the amount of pollutants influences the Human Development Index (HDI). To clearly observe this, the relationship between the quantity of pollutants released into the atmospheric air and the HDI was analyzed and presented in the form of a regression equation (Graph 2). The correlation coefficient value is -0.939, indicating a strong negative correlation between the amount of waste and the Human Development Index. The coefficient of determination (R^2) is 0.840, meaning that 84% of the variation is explained by this dependency. This signifies a strong interdependence between the variables. The correlation coefficient also suggests that higher values of pollutants emitted from stationary sources into the atmosphere correspond to lower HDI values, and vice versa. This clearly demonstrates a relationship between these factors. Therefore, when assessing the level of regional development, it is essential to consider factors affecting the ecological environment.



Graph 2. Dependence between the amount of pollutants released into atmospheric air and the Human Development Index (*Source:* Graph compiled by the author based on the statistical materials of "Environment in Azerbaijan" and data from the Global Data Laboratory [3, 29])

In September 2000, an international event called the "Millennium Forum" organized by the United Nations, was held, during which the Millennium Development Goals for the 21st century were established for countries worldwide. The MDGs adopted at the forum prioritized addressing issues aimed at significantly improving the quality of life for all people globally, including eliminating unemployment, increasing incomes, achieving universal education, reducing child mortality, combating diseases, improving environmental quality, and more [30].

The quality of life of the population is a key indicator reflecting and evaluating the socio-economic development of each state. This indicator should be assessed within a broader context, as it encompasses more than just factors such as health, education, and income.

For the first time, a comparative assessment of quality of life through indexation was carried out within the province. During the calculation of the index, various indicators were taken into account. Each region's geographical location, area, level of socio-economic development, population size, and settlement structure are factors influencing the index calculation. Each of these indicators carries a specific weight, which varies according to the characteristics of the indicators. The primary purpose of the indexation is to bring the indicators to a common scale in order to enable comparison between regions. The analysis revealed that the weights of the indices are variable. This variability depends on the geographical location, area, level of socio-economic development, population size, and settlement patterns of the regions.

Based on the proposed formulas for assessing the quality of life in the administrative districts within the Greater Caucasus region, calculations were performed using indicators such as average life expectancy, income, education level, water supply, and the amount of pollutants released into the atmosphere. Among the regions in Azerbaijan, the highest quality of life and socio-economic development level is observed in Baku city. Therefore, Baku was not compared with other administrative districts of the Greater Caucasus region in this study. All data were obtained from the official statistical records of 2022 [1, 2, 3]. The Quality of Life Index (QLI), used as the criterion for evaluating quality of life, varies between 0.185 and 0.676 across 18 administrative districts of the Greater Caucasus region (Table 1).

Table 1

Quality of Life Index of Administrative Districts within the Greater Caucasus Region

№	Administrative districts	Demographic Index, I_d	Economic Index, I_e	Social Index, I_s	Environmental Index, I_{eko}	Quality Life Index, QLI	QLI_{eco}
1	Sumgait	0,530	0,754	0,773	0,352	0,676	0,595
2	Absheron	0,536	0,406	0,707	0,898	0,536	0,627
3	Khizi	0,491	0,136	0,321	0,843	0,278	0,419
4	Aghsu	0,452	0,331	0,174	0,520	0,297	0,353
5	Ismayilli	0,458	0,477	0,431	0,565	0,454	0,481
6	Gobustan	0,452	0,119	0,119	0,545	0,185	0,275
7	Shamakhi	0,452	0,499	0,18	0,541	0,351	0,399
8	Khachmaz	0,460	0,743	0,089	0,505	0,314	0,362
9	Guba	0,485	0,591	0,170	0,508	0,365	0,401
10	Gusar	0,524	0,395	0,268	0,549	0,381	0,423
11	Siyazan	0,506	0,308	0,362	0,707	0,384	0,465
12	Shabran	0,446	0,133	0,237	0,605	0,241	0,332
13	Balakan	0,503	0,474	0,301	0,504	0,415	0,437
14	Gakh	0,455	0,399	0,653	0,576	0,491	0,512
15	Gabala	0,472	0,329	0,553	0,576	0,444	0,442
16	Oghuz	0,536	0,296	0,401	0,626	0,397	0,489
17	Shaki	0,479	0,506	0,389	0,541	0,455	0,476
18	Zagatala	0,503	0,207	0,408	0,546	0,349	0,398

Assessment of Quality of Life	
Low	(0,100-0,399)
Medium	(0,400-0,599)
High	(0,600-0,899)
Very high	(0,900-1,0)

Source: The table was calculated by the applicant using the formula proposed, based on the statistical material "Regions of Azerbaijan" [1, 2, 3]

According to the Quality of Life Index by administrative districts of the Greater Caucasus region, the top five positions are held by Sumgayit, Absheron, Gakh, Sheki, and Ismayilli, respectively.

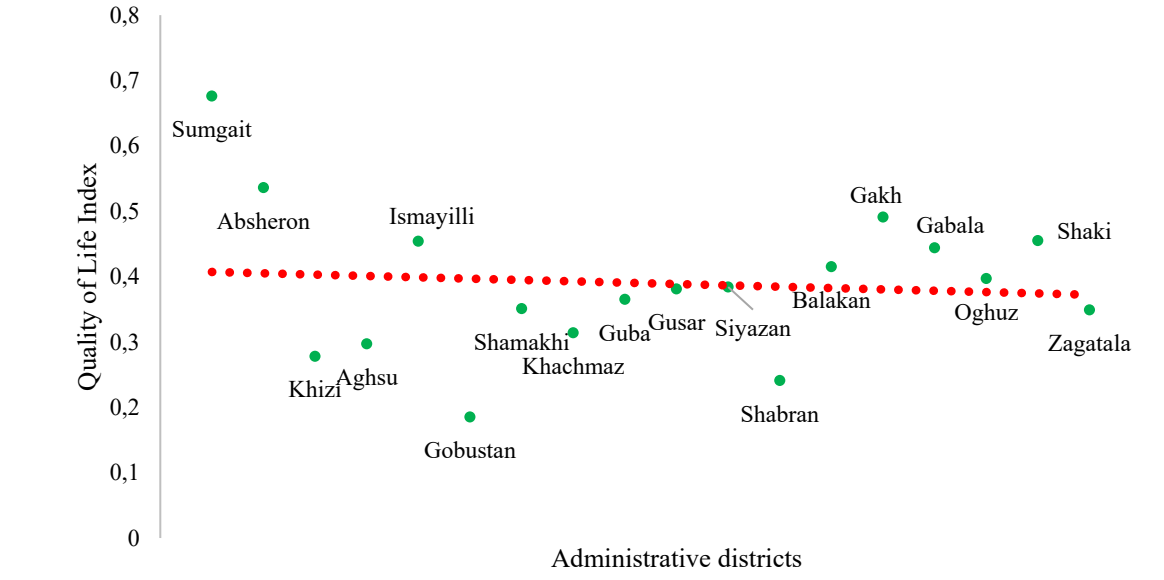
In terms of grouping, Sumgayit city falls into the high category; the administrative districts of Absheron, Ismayilli, Balakan, Gakh, Gabala, and Sheki are in the medium category; while the districts of Khizi, Agsu, Gobustan, Shamakhi, Khachmaz, Guba, Gusar, Siyazan, Shabran, Oguz, and Zagatala are categorized as low. No administrative district was classified under the very high category.

In terms of sub-indices, Absheron district ranked first in the demographic and environmental index, Sumgayit city ranked first in the economic index, and Gakh district ranked first in the social index.

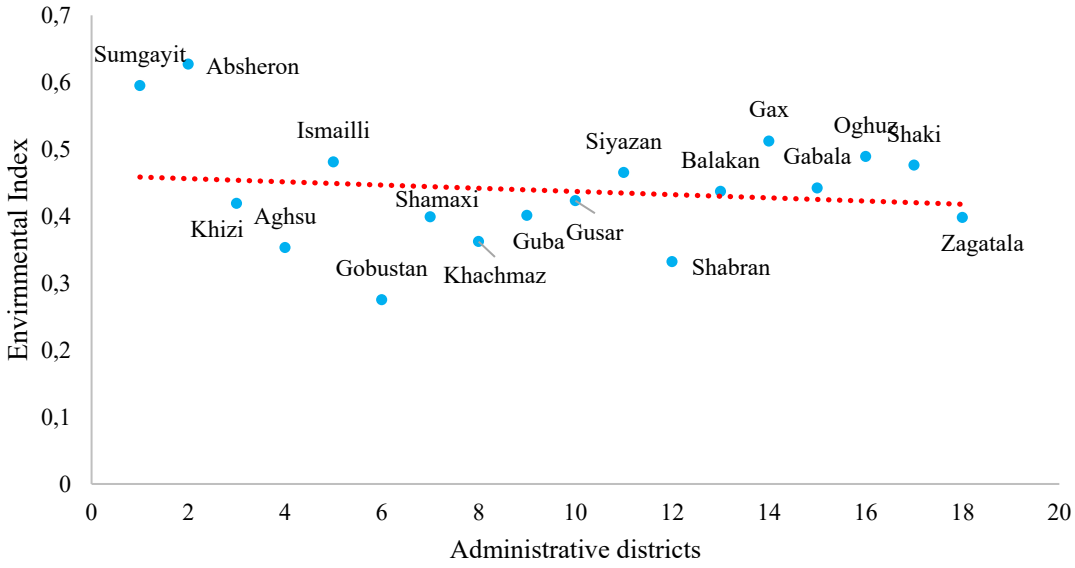
The average value of the index is 0.390. The administrative districts are unevenly distributed according to the average value. Eight administrative districts have scores above the average, while ten administrative districts have scores below the average (Graph 3, a).

Considering the environmental index, Sumgayit city has moved from the high tier to the medium tier, Absheron district has moved from the medium tier to the high tier, and the districts of Khizi, Guba, Gusar, Siyazan, and Oguz have moved from the low tier to the medium tier. The positions of the other districts remain unchanged (Graph 3, b).

The Quality of Life Index has also been calculated for the economic regions of the Greater Caucasus, and in order to highlight interregional differences, the city of Baku was included in the compari-



a)



b)

Graph 3. Distribution of administrative districts according to the Quality of Life Index (a) and Environmental Index (b) (*Source:* The charts were created by the applicant based on the data from Table 1)

son. In the Quality of Life Index ranking, Baku city holds the 1st place, and the Absheron-Khizi economic region ranks 2nd. Both are in the high tier. The Sheki-Zagatala and Guba-Khachmaz economic regions are in the medium tier, while in the overall ranking, the Mountainous Shirvan economic region ranks last, in the low tier (Figure 1).

According to the grouping, Baku city is in the high tier, the Absheron-Khizi and Sheki-Zagatala economic regions are in the medium tier, and the Guba-Khachmaz and Mountainous Shirvan economic regions are in the low tier. When comparing by individual indices, the economic regions rank in the medium tier for the demographic index, Baku is in the high tier for the economic index, while Absheron-Khizi and Guba-Khachmaz economic regions fall into the medium group. For the social index, Baku and Absheron-Khizi are in the high tier, Sheki-Zagatala is in the medium tier, and Guba-Khachmaz and Mountainous Shirvan are in the low tier.

Considering the environmental index, Baku city's Quality of Life Index slightly decreased, while the scores of other economic regions increased. Nevertheless, when accounting for the environmental index, Baku city remains the leader in the Quality of Life Index. The positions of the other economic regions have remained unchanged (Table 2).

Based on the provided data, there are various correlation relationships among the quality of life in-

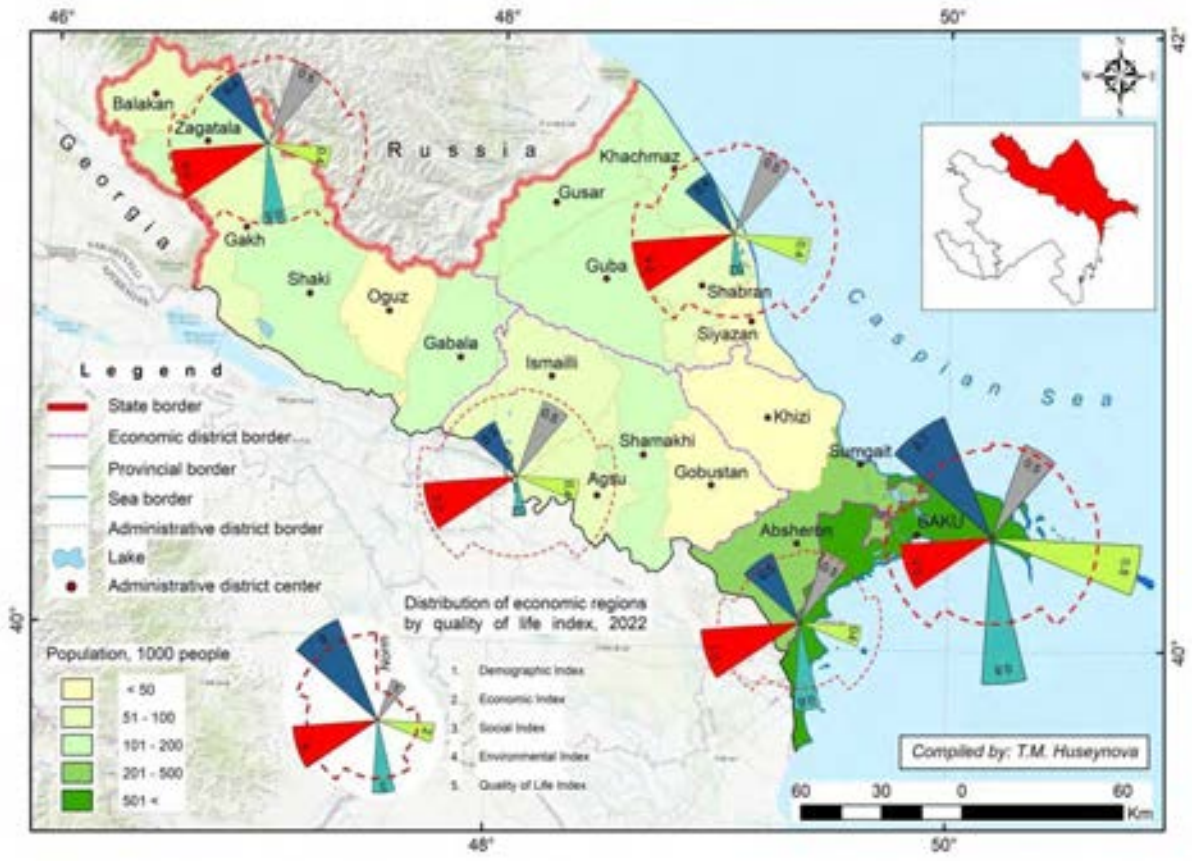


Fig. 1. Map of the distribution of the Quality of Life Index by economic regions in the Greater Caucasus

Table 2

Ranking of the economic regions within the Greater Caucasus according to the Quality of Life Index (QLI) (2022)

Economic Regions	Demographic Index, I_d	Economic Index, I_e	Social Index, I_s	Environmental Index, I_{eco}	Quality Life Index, QLI	QLI_{eco}
Baku	0,521	0,808	0,769	0,492	0,686	0,638
Absheron-Khizi	0,519	0,432	0,600	0,698	0,512	0,559
Mountainous Shirvan	0,453	0,364	0,226	0,543	0,334	0,386
Guba-Khachmaz	0,484	0,433	0,225	0,575	0,362	0,415
Sheki-Zagatala	0,491	0,368	0,451	0,561	0,434	0,466
Region	0,494	0,575	0,454	0,574	0,466	0,493

Source: The table was calculated by the applicant using the proposed formula, based on the data from the statistical material "Regions of Azerbaijan" [2].

dicators. A positive correlation is observed between the Quality of Life Index and the demographic, economic, and social indices (r=0.576, r=0.706, r=0.860, respectively). This means that the increase in these indices leads to an improvement in the quality of life. In particular, there is a strong correlation between the social index and the quality of life (r=0.860), indicating that social factors significantly affect the quality of life.

Furthermore, a negative correlation (r=-0.517) is observed between the environmental and economic indices. Overall, there is a moderate linear relationship between the other three indices. As a result, the interrelationship of quality of life indicators not only emphasizes the importance of social factors but also highlights the contradictions between environmental and economic factors. Such analyses can be useful in decision-making processes aimed at improving the quality of life.

Considering the socio-economic, ecological, and demographic conditions of the Greater Caucasus region, there is a need to establish development models for regulating population settlement in economic and administrative regions and maintaining

demographic potential at the local level. The main goal of creating a regional quality of life model is to ensure the quantitative and qualitative growth of the population in line with the region's socio-economic development [12]. The quality of life of the population is a complex and multifaceted concept that encompasses demographic (longevity, natural increase), economic (per capita income, wages), social (education, healthcare, safety of individuals), and ecological conditions. Based on international experience, a regional quality of life model has been developed to improve the quality of life of the population in the Greater Caucasus and achieve the sustainable development of its regions. The preparation of this model has taken into account the demographic, social, economic, ecological, and governance conditions of the region. It is considered appropriate to use the following comprehensive indicator system to characterize the quality of life of the population (Figure 2).

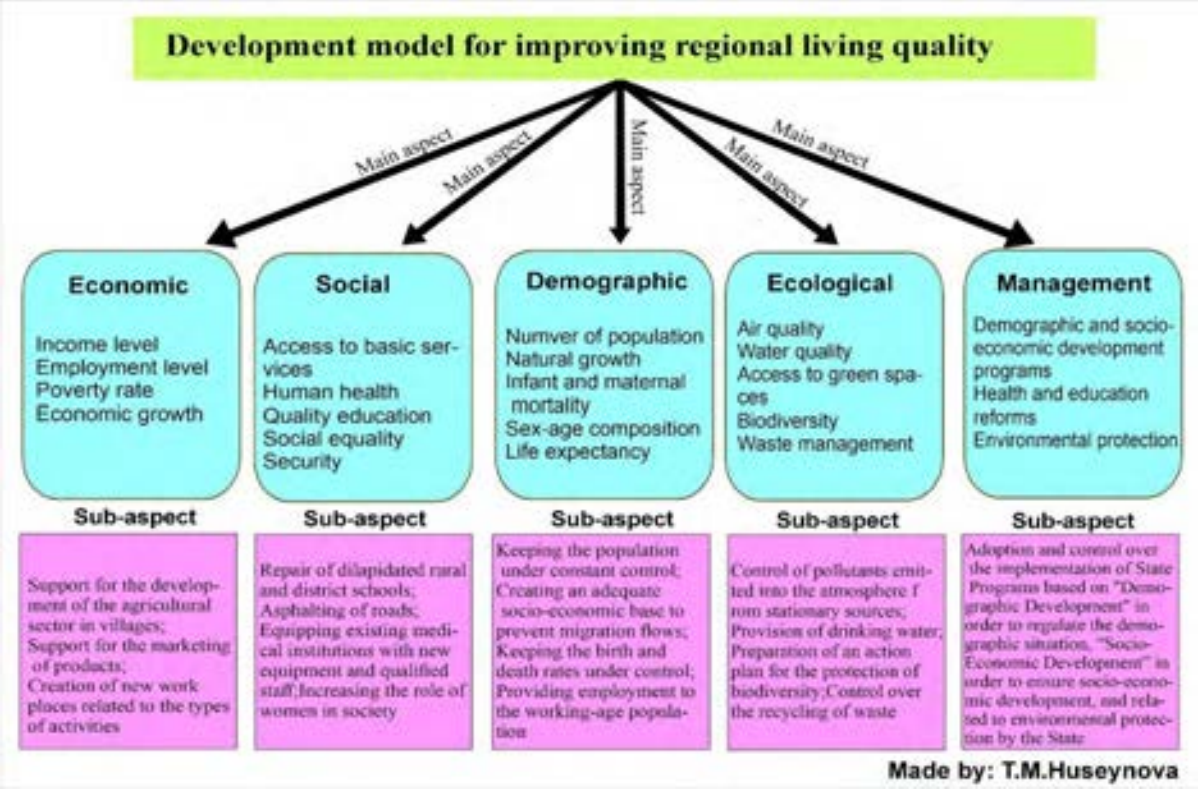


Fig. 2. Development model for improving regional quality of life

In the context of contemporary socio-economic development, the comprehensive study of human-environment relations and the organization of their mutual compatibility is considered one of the pressing issues of our time. The complexity of the physical-geographical conditions of the Greater Caucasus region, the diversity of its climate, the sharpness of its hypsometric features, and the dependence of the demographic factor on the environment condition the region's development [11]. Therefore, when determining the demographic development problems of quality of life in the region, the natural environment must be taken into account. Excessive exploitation, pollution, and the destruction of ecosystems lead to the globalization of local environmental problems. People in vast geographical areas suffer from such issues. Sometimes, we witness the disruption of traditional climate regimes, migration, demographic problems, and the spread of diseases [19]. Regional warming already shows its impacts on the ecological environment of the Greater Caucasus. This, in turn, leads to changes in the population's living standards and incomes, and a decrease in the quality of life.

Thus, taking into account the diversity of orography, proximity to the Caspian Sea, and relations with neighboring countries, it is advisable to use the general indicators mentioned above when evaluating the quality of life in large and small settlements and in various economic regions of the Greater Caucasus. In determining the quality of life in this region, demographic criteria are given primary attention. The demographic factors in the region, in turn, depend on socio-economic indicators, the formation of the natural environment, and its resource potential.

Conclusions. Thus, the emergence of ecological problems has increased attention to the deeper study of their impact on the quality of life. Therefore, the evaluation of the quality of life should not be one-sided; alongside demographic, social, and economic factors, ecological and human factors must also be given priority.

1. In the Greater Caucasus region, a strong positive correlation has been observed between the Human Development Index and life expectancy, education level, and population income (with respective values of r=0.967, r=0.965, and r=0.992), while a negative correlation is noted with the amount of pollutants released into the atmosphere (r=-0.939). It has been determined that the environmental factor influences human development.

2. The indicators affecting the quality of life of the population have been indexed, and regional disparities have emerged in their interrelationships. A positive correlation exists between the Quality of Life Index and the demographic, economic, and social indices (with respective values of r=0.576, r=0.706, and r=0.860). However, the correlation between the ecological and economic indices is weak, and the linear relationship is negative (r=-0.517).

3. The average value of the index is 0.390. Eight administrative districts have scores above the average, while ten districts have scores below the average. Sumgayit city is in the high tier, while the administrative districts of Absheron, Ismayilli, Balakan, Gakh, Gabala, and Sheki are in the medium tier. The administrative districts of Khizi, Agsu, Gobustan, Shamakhi, Khachmaz, Guba, Gusar, Siyazan, Shabran, Oguz, and Zagatala are in the low tier. No administrative district is in the very high tier.

During the analysis of the development model to improve regional quality of life, it was found that, to prevent the migration of the population to cities, it is crucial to develop the agricultural sector in rural areas, provide high-quality social, cultural, and household services, offer education and vocational training in various sectors for the local workforce, create jobs in line with modern professions and specialties, eliminate income disparities, increase state support for mothers and children, provide financial assistance to large families, improve environmental quality, and, as a result, ensure the preservation of demographic potential in local areas.

Bibliography

1. *Azərbaycanın əhalisi-2023. (2023). Bakı: Azərbaycan Respublikası Dövlət Statistika Komitəsi, 137.*
2. *Azərbaycanın regionları-2022. (2023). Bakı: Azərbaycan Respublikası Dövlət Statistika Komitəsi, 865.*
3. *Azərbaycanda ətraf mühit-2022 (2023), Bakı: Azərbaycan Respublikası Dövlət Statistika Komitəsi, 136.*
4. *Agakishiyeva G.R., Ismayılova E.A. (2024). Socio-economic problems of the development of tourist and recreational complexes in Azerbaijan. Journal of Geology, Geography and Geoecology. 33(2), 209-221. https://doi.org/10.15421/112419*
5. *Abbasov, R., Karimov, R. Jafarova, N. (2022). Mountain ecosystem values. Ecosystem Services in Azerbaijan: Value and Losses, 1, 29-69. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08770-7_2*
6. *Bədəlov, E.S. (2016). Abşeron iqtisadi-coğrafi rayonunda sosial-demoqrafik problemlər və məskunlaşma problemləri. Bakı: Avropa, 200.*
7. *Eminov, Z.N. Rzayeva, S.İ. (2022) Azərbaycan Respublikasında əhalinin həyat keyfiyyətinin müasir vəziyyəti. Bakı: Region Press, 240.*
8. *Ələkbərov, U.K. (2013). Davamlı insan inkişafı və ekoloji sivilizasiyanın əsasları. Bakı: Təhsil, 224.*
9. *Quliyev, C.B., Abdullayeva, R.S., Rizayeva, M.H. (2014). Rəqabət qabiliyyətli iqtisadiyyatda həyat səviyyəsi və onun keyfiyyətcə yaxşılaşdırılmasının sosial-iqtisadi problemləri. Bakı: Avropa, 198.*
10. *Huseynova, T.M. (2022). An evaluation of the life quality and human development index (on the example of the Greater Caucasus province of the Republic of Azerbaijan). Journal of Geography and tourism, 68, 29-37. https://doi.org/10.17721/2308-135X.2022.68.29-37*
11. *Huseynov, J.S., Huseynova, T.M., Tagiyev, A.Sh. (2025). Assessment of the impact of climate changes on the quality of life of the population in the Greater Caucasus region of the Republic of Azerbaijan. Journal of Geology, Geography and Geoecology. 34(1), 100-111. doi: https://doi.org/10.15421/112510*
12. *Huseynova, T.M. (2024). Əhalinin yaşayış keyfiyyətinə təsir edən sosial-iqtisadi amillər (Azərbaycan Respublikasının Böyük Qafqaz vilayəti timsalında). Akademik Tarih Ve Düşünce Dergisi, 11(2), 880-889. https://doi.org/0000-0001-5876-0692*
13. *Huseynova, T.M. (2024). Influence of the environment on human health and quality of life (on the example of the Greater Caucasus of the Republic of Azerbaijan) Journal of Geography and water resources, 1, 32-40. https://doi.org/10.55764/2957-9856/2024-1-32-40.5*
14. *Imrani, Z.T., Mammadova, Sh. İ., Hadjiyeva, N.N., Vysotskyi, O.Y. (2021). The main directions of sustainable socio-economic development of the Caspian littoral areas of the Republic of Azerbaijan and the existing environmental problems, Journal of Geology, Geography and Geoecology. 30(4), 652-665. doi: https://doi.org/10.15421/112160*
15. *Məmmədova, A.R. (2024). Bakı şəhərində atmosferin çirklənməsinin tənəffüs sistemi xəstəliklərinin coğrafi yayılmasında rolunun tədqiqi, Azərbaycan Coğrafiya Cəmiyyətinin əsərləri, Coğrafiya və təbii resurslar. 2(22), 72-80. doi: https://doi.org/10.59423/gnr.2024.65.48.013*
16. *Muradov, A.N. (2007). Yaşayış keyfiyyətinin qiymətləndirilməsinin nəzəri aspekti Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının xəbərləri, İqtisadiyyat elmləri seriyası, 4, 46-50.*
17. *Orucov, E.Q. (2018). Ekonometrika. Bakı: Avropa, 384.*
18. *Paşayev, N.Ə. Əyyubov, N.H. Eminov, Z.N. (2010). Azərbaycan Respublikasının iqtisadi, sosial və siyasi coğrafiyası. Bakı: Çıraq, 416.*

19. Rzayeva S.I. (2025). Medical-geographical basis of the spread of diseases emerging in the context of contemporary climate change in the city of Baku / Journal of Geology, Geography and Geoecology, 34(2), 393-402. https://doi.org/10.15421/112533
20. Evelina, P. Nick, K. Angelos, A. Niakas, D. (2009). Assessing the socio-economic and demographic impact on health-related quality of life: evidence from Greece. Springer: International Journal of Public Health. v.54, 241-249. doi: https://doi.org/10.1007/s00038-009-8057-x
21. Гудзеляк Ірина (2024). Демографічний розвиток країн Північної Європи: актуальні тренди для українського досвіду. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (61), 166-179. doi: https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-14
22. Luiz, R., Dagostini, C.F., Alfredo, C.F. (2008). Quality of Life and Quality of Living Conditions in Rural Areas: Distinctively Perceived and Quantitatively Distinguished. Springer: Social Indicators Research, v. 89, 487-499. https://doi.org/10.1007/s11205-008-9245-4
23. Cella, D. F. (1994). Quality of life: Concepts and definition. Journal of Pain Symptom Management, 9, 186-192. doi: https://doi.org/10.1016/0885-3924(94)90129-5
24. Quality of life: facts and views. Eurostat Statistical books. (2015). 268.
25. Rashidi, M., Ebadi, A., Fathi-Ashtiani, A. (2017). Investigating the Relationship between Demographic Factors and Quality of Life and Health in Retired Nurses. Health Research Journal, 2 (4), 269-277. https://doi.org/10.29252/hrjbaq.2.4.269
26. Rusen, K. (2012). The quality of life and the environment. Elsevier: Social and behavioral Sciences, 35, 23-32. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.02.059
27. Streimikiene, D. (2015). Environmental indicators for the assessment of quality of life. Intellectual economics 9, 67-79. https://doi.org/10.17059/2016-4-13
28. Thakur, R., Sharma, D. (2019). A Study of Impact of Demographic Variables on Quality of Work Life. New Delhi: Productivity, 59 (4), 358-365. https://doi.org/10.32381/PROD.2019.59.04.5
29. Global Data Laboratory. Available at: https://globaldatalab.org/shdi/table/shdi/AZE/?
30. Human Development Reports (1990-2024): Available at: https://www.un-ilibrary.org/content/periodicals/24123129

References

1. Population of Azerbaijan - 2023. (2023). Baku: State Statistical Committee of the Republic of Azerbaijan, 137. [in Azerbaijani]
2. Regions of Azerbaijan - 2022. (2023). Baku: State Statistical Committee of the Republic of Azerbaijan, 865. [in Azerbaijani]
3. Environment in Azerbaijan - 2022. (2023). Baku: State Statistical Committee of the Republic of Azerbaijan, 136. [in Azerbaijani]
4. Agakishiyeva G.R., Ismayılova E.A. (2024). Socio-economic problems of the development of tourist and recreational complexes in Azerbaijan. Journal of Geology, Geography and Geoecology. 33(2), 209-221. https://doi.org/10.15421/112419
5. Abbasov, R., Karimov, R. Jafarova, N. (2022). Mountain ecosystem values. Ecosystem Services in Azerbaijan: Value and Losses, 1, 29-69. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08770-7_2
6. Badalov, E.S. (2016). Social-demographic problems and settlement issues in the Absheron economic-geographical region. Baku: Avropa, 200. [in Azerbaijani]
7. Eminov, Z.N. Rzayeva, S.İ. (2022) Current status of the quality of life of the population in the Republic of Azerbaijan. Bakı: Region Press, 240. [in Azerbaijani]
8. Alekberov, U.K. (2013). Sustainable human development and the foundations of ecological civilization. Baku: Education, 224. [in Azerbaijani]
9. Guliyev, C.B., Abdullayeva, R.S., Rizayeva, M.H. (2014). Socio-economic problems of living standards and their qualitative improvement in a competitive economy. Baku: Avropa, 198. [in Azerbaijani]
10. Huseynova, T.M. (2022). An evaluation of the life quality and human development index (on the example of the Greater Caucasus province of the Republic of Azerbaijan). Journal of Geography and tourism, 68, 29-37. https://doi.org/10.17721/2308-135X.2022.68.29-37
11. Huseynov, J.S., Huseynova, T.M., Tagiyev, A.Sh. (2025). Assessment of the impact of climate changes on the quality of life of the population in the Greater Caucasus region of the Republic of Azerbaijan. Journal of Geology, Geography and Geoecology. 34(1), 100-111. https://doi.org/10.15421/112510
12. Huseynova, T.M. (2024). Socio-economic factors affecting the quality of life of the population (on the example of the Greater Caucasus region of the Republic of Azerbaijan). Academic Journal of History and Thought, 11(2), 880-889. https://doi.org/0000-0001-5876-0692
13. Huseynova, T.M. (2024). Influence of the environment on human health and quality of life (on the example of the Greater Caucasus of the Republic of Azerbaijan) Journal of Geography and water resources, 1, 32-40. https://doi.org/10.55764/2957-9856/2024-1-32-40.5
14. Imrani, Z.T., Mammadova, Sh. İ., Hadjiyeva, N.N., Vysotskyi, O.Y. (2021). The main directions of sustainable socio-economic development of the Caspian littoral areas of the Republic of Azerbaijan and the existing environmental problems, Journal of Geology, Geography and Geoecology. 30(4), 652-665. https://doi.org/10.15421/112160
15. Mammadova, A.R. (2024). Study of the role of atmospheric pollution in the geographical spread of respiratory diseases in Baku city, Proceedings of the Azerbaijan Geographical Society, Geography and Natural Resources. 2(22), 72-80. doi: https://doi.org/10.59423/gnr.2024.65.48.013. [in Azerbaijani]

16. *Muradov, A.N. (2007). Theoretical aspect of assessing the quality of life. News of the Azerbaijan National Academy of Sciences, Economic Sciences Series, 4, 46-50. [in Azerbaijani]*
17. *Orujov, E.G. (2018). Econometrics. Baku: Europe, 384. [in Azerbaijani]*
18. *Pashayev, N.A. Eyyubov, N.H. Eminov, Z.N. (2010). Economic, social and political geography of the Republic of Azerbaijan. Baku: Chirag, 416. [in Azerbaijani]*
19. *Rzayeva S.I. (2025). Medical-geographical basis of the spread of diseases emerging in the context of contemporary climate change in the city of Baku. Journal of Geology, Geography and Geoecology, 34(2), 393-402. https://doi.org/10.15421/112533*
20. *Evelina, P. Nick, K. Angelos, A. Niakas, D. (2009). Assessing the socio-economic and demographic impact on health-related quality of life: evidence from Greece. Springer: International Journal of Public Health. 54, 241-249. https://doi.org/10.1007/s00038-009-8057-x*
21. *Hudzelyak, I. (2024). Demographic development of the countries of Northern Europe: current trends for the Ukrainian experience. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (61), 166-179. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-14*
22. *Luiz, R., Dagostini, C.F., Alfredo, C.F. (2008). Quality of Life and Quality of Living Conditions in Rural Areas: Distinctively Perceived and Quantitatively Distinguished. Springer: Social Indicators Research, 89, 487-499. https://doi.org/10.1007/s11205-008-9245-4*
23. *Cella, D.F. (1994). Quality of life: Concepts and definition. Journal of Pain Symptom Management, 9, 186-192. doi:https://doi.org/10.1016/0885-3924(94)90129-5*
24. *Quality of life: facts and views. Eurostat Statistical books. (2015). 268.*
25. *Rashidi, M., Ebadi, A., Fathi-Ashtiani, A. (2017). Investigating the Relationship between Demographic Factors and Quality of Life and Health in Retired Nurses. Health Research Journal, 2 (4), 269-277. https://doi.org/10.29252/hrjbaq.2.4.269*
26. *Rusen, K. (2012). The quality of life and the environment. Elsevier: Social and behavioral Sciences, 35, 23-32. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.02.059*
27. *Streimikiene, D. (2015). Environmental indicators for the assessment of quality of life. Intellectual economics 9, 67-79. https://doi.org/10.17059/2016-4-13*
28. *Thakur, R., Sharma, D. (2019). A Study of Impact of Demographic Variables on Quality of Work Life. New Delhi: Productivity, 59 (4), 358-365. https://doi.org/10.32381/PROD.2019.59.04.5*
29. *Global Data Laboratory. Available at: https://globaldatalab.org/shdi/table/shdi/AZE/?*
30. *Human Development Reports (1990-2024): Available at: https://www.un-ilibrary.org/content/periodicals/24123129*

Оцінка якості життя населення в Азербайджані (на прикладі Великого Кавказу)

Турана Гусейнова
д. філософії (географія), Міністерство науки та освіти Азербайджанської Республіки,
Інститут географії, Баку, Азербайджан

Дослідження проводилося з метою оцінки якості життя населення в адміністративних районах регіону Великого Кавказу, виявлення регіональних диспропорцій та пропозиції рішень для їх усунення. Вивчення змін показників якості життя населення в регіоні Великого Кавказу, вивчення соціально-економічних умов та демографічних проблем населення, а також зусилля щодо їх вирішення проводилися з використанням системно-структурного, порівняльного аналізу, географічного моделювання та картографічних методів (програмне забезпечення ArcGIS) для перенесення зібраних даних на карти. Під час математико-статистичних розрахунків використовувався MS Excel та його інструменти обробки, такі як Xlstat. У дослідженні, під час оцінки якості життя населення, показники індексувалися з урахуванням демографічних, економічних, соціальних та екологічних факторів. У цьому дослідженні автор пропонує розрахунок індексу якості життя (ІЯЖ) для вимірювання якості життя населення або загального рівня розвитку регіонів. Для оцінки якості життя населення було визначено чотири групи показників: демографічні, економічні, соціальні та екологічні. У дослідженні автор пропонує розрахунок індексу якості життя (ІЯЖ) для вимірювання загального рівня розвитку населення або регіонів. Індекс якості життя розраховується як середнє геометричне чотирьох індексів (демографічного, економічного, соціального та екологічного). Порівняльна оцінка якості життя за допомогою індексації була проведена вперше в регіоні. Під час розрахунку індексу враховуються різні показники. Кожен з цих показників має певну вагу, яка змінюється залежно від характеристик показників. Головною метою індексації є стандартизація показників для порівняння регіонів. Аналіз показав, що ваги індексів є змінними. Ця мінливість залежить від географічного розташування, площі, рівня соціально-економічного розвитку, чисельності населення та структури розселення регіонів. Індекс якості життя був нормалізований до діапазону від 0 до 1, де значення «1» вказує на регіон з найвищою якістю життя порівняно з іншими, а «0» – на регіон з найнижчою. Значення індексу були згруповані таким чином: низький (0,100–0,399), середній (0,400–0,599), високий (0,600–0,899) та дуже високий (0,900–1,000).

***Ключові слова**: регіон Великого Кавказу, якість життя населення, індекс якості життя, демографічні показники, соціально-економічні показники, екологічні показники, регіональні диспропорції.*

Надійшла 17 жовтня 2025 р.
Прийнята 18 листопада 2025 р.

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-14
UDC 910:004.65]:[338.483.11(21):551.4](477.54)
Received 3 October 2025
Accepted 20 November 2025

The tourism of collecting: a case study from the Kharkiv region, Ukraine

Polina Dovzhenko [1]
PhD student, Department of Physical Geography and Cartography,
[1] V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine
e-mail: polina.dovzhenko@student.karazin.ua, https://orcid.org/0009-0007-6843-0962;
Kateryna Borysenko [1]
PhD (Pedagogy), Associate Professor, Department of Physical Geography and Cartography,
e-mail: k.borysenko@karazin.ua, http://orcid.org/0000-0002-7435-6857;
Vladyslav Popov [1]
Senior Lecturer, Department of Physical Geography and Cartography,
e-mail: v.popov@karazin.ua, http://orcid.org/0000-0002-5960-631X;
Simon M. Hutchinson [2]
PhD (Palaeolimnology), Associate Professor, School of Sciences, Engineering and Environment,
[2] University of Salford, The Crescent, Salford, United Kingdom,
e-mail: s.m.hutchinson@salford.ac.uk, https://orcid.org/0000-0003-0072-1062

ABSTRACT

Statement of the problem. Collecting tourism in Ukraine is predominantly practiced in an amateur form. Consequently, there is a lack of relevant statistical information, which impedes the execution of comprehensive scientific research. Nevertheless, the existence of a natural resource base highly suitable for the development of collecting tourism across Ukraine, and particularly within the Kharkiv region, underscores the relevance of this topic and the need to study its potential for further development.

The relevance of the work lies in the fact that today there is no reasonable definition of the concept of "collecting tourism", and this tourist activity in the context of the regions of Ukraine requires a thorough study.

The aim of the study is to outline the peculiarities of collecting tourism and to investigate the impact of physical and geographical prerequisites on the organisation of collecting tourism on the example of the Kharkiv region.

The object of this study is collecting tourism.

The subject is the physical and geographical prerequisites for the development of collecting tourism and the general features of its organisation.

Methods. The descriptive method is essential for systematically characterizing the studied territory and providing a theoretical summary of the collected information. This is complemented by the method of idealization, which is applied to construct "ideal models" of natural-territorial complexes for comparison with the real situation, particularly during the classification stage. The classification method is used to systematize existing knowledge and develop an original classification scheme. The cartographic method involves studying general geographical and thematic maps, as well as deciphering satellite images and utilizing the digital elevation model of the Kharkiv region as auxiliary elements. The comparative method ensures the identification of similarities and differences among the study objects, specifically when analyzing the natural resource base of the territorial communities in the Kharkiv region. The forecasting method is utilized to formulate assumptions about future tourist demand, specifically determining which objects of interest may attract a tourist-collector in the region.

Results. The research analyzed the conceptual and terminological foundation of collecting tourism, revealing a significant gap in both domestic and foreign studies where it is not yet defined as a distinct phenomenon. The authors proposed and substantiated their own theoretical placement of collecting tourism within the scientific system. This work provided the set-up for a practical study of the Kharkiv region's geological, geomorphological features, and natural resource base in the context of collecting tourism. The study investigated the organisational specifics of this niche tourism and resulted in the development of practical recommendations for constructing specialized collecting tourist routes that account for the narrow focus, aiming to ensure a high-quality final product.

In examining the development prospects, the study confirmed that the Kharkiv region possesses a promising natural resource base highly suitable for collecting tourism; however, current activities are rendered impossible due to the ongoing negative impact of military actions. Additionally, the research analyzed the technical possibilities for route visualization, comparing the capabilities of Google My Maps and ThingLink programs.

Keywords*: collecting tourism, landscape, geographic information system (GIS), map, tourist route, Kharkiv region.*

In cites: Dovzhenko Polina, Borysenko Kateryna, Popov Vladyslav, Hutchinson Simon M. (2025). The tourism of collecting: a case study from the Kharkiv region, Ukraine. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 184-196. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-14

Introduction. Today people in Ukraine face a lot of stressful situations: economic crisis, the post-COVID-19 pandemic period, which entailed several bans and restrictions, and war. All these processes put significant pressure on the mental and emotional state of a person. Tourism and recreation are ways to improve overall human health. Collecting tourism ensures a direct interaction between people and nature, which plays a significant role in restoring the physical and mental strength of tourists.

© Dovzhenko Polina, Borysenko Kateryna, Popov Vladyslav, Hutchinson Simon M., 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

This type of tourist activity is accessible and popular and in Ukraine it is widespread in an amateur form, i.e. engaged by 'wild' tourists. This, in turn, is reflected in the lack of relevant statistical information, which makes it difficult to conduct any relevant research. Nevertheless, the natural resource base for the existence of collecting tourism in Ukraine, and in particular in the Kharkiv region, indicates the relevance of this topic and the need to study its development and further spread.

Previous experience. Collecting tourism is not a widespread type of recreation in the world, although the practice of collecting is perhaps the oldest type of human activity and, moreover, a way of life since the era of the primary communal (pre-social) structure of human communities. However, in some countries, gathering is restricted by law, mainly because of the threat of destruction of organisms (mainly plants, but also animals) that are on the verge of extinction or threatened with extinction. However, despite the fact that the environmental protection of natural systems is recognised as one of the primary and urgent needs of humanity, the collection business often takes on a predatory character [2]. In certain cases, collecting is allowed even for species restricted by law, most often when it is an indispensable means of subsistence for primary communities or is justified by other significant circumstances, but is limited by quotas and regulated by fee limits [3]. The authors believe that this practice, although seemingly contradictory to the development of collecting tourism, makes sense and should therefore be coordinated with appropriate conservation measures.

A prerequisite for the development of collecting tourism is the "rudimentary" craving of large segments of a population for gathering (along with hunting and fishing) as a form of active recreation. In this sense, we see a prerequisite for the organisation of collecting tourism to become one of the areas of modern ecological business. However, research in this area is still not widespread, and especially in Ukraine. The authors undertook as one of their methodological tasks to present and analyse the existing scattered and sometimes contradictory attempts to include some types of active recreation, such as gathering, in ecotourism to implement gathering in its rather extensive structure [4]. So far, only M.M. Melniychuk and T.P. Bezsmertniuk mention collecting tourism as a form of ecotourism in their work [5].

It is worth noting that, in the authors' opinion, the following definitions are the closest to the concept of "collecting tourism".

Researchers M.P. Kliap and F.F. Shandor define *mushroom tourism* as "a type of tourism aimed at visiting places where edible mushrooms grow, searching for, consuming and buying mushrooms directly in the mushroom region". The authors also note that this type of tourist activity has long been a component of other types of tourism, which in the context of this paper is important in terms of studying mushroom tourism, as the authors propose to consider mushroom picking as its integral part.

The above-mentioned experts also distinguish such types of tourism as *fruit tourism*, which "aims to visit places of fruit distribution, search, consumption and purchase of fruit directly in the fruit region", and *berry tourism*, which "aims to visit places of wild berries distribution, search, consumption and purchase of berries directly in the berry region".

Another concept that can be considered is *forest tourism* – "a multi-day overnight trip of a group of people along a certain route for the purpose of recreation, physical development, and cognition". The aforementioned M.P. Kliap and F.F. Shandor note that such tourist activity is a combination of recreation and mushroom and berry picking. Forest tourism is also aimed at several activities, including amateur crafts (collection of mushrooms, berries, medicinal plants, collections of forest species) [6].

Analysing the multifaceted nature of this concept, it can be noted that it would be quite appropriate to distinguish from it some of the characteristics for a separate term – collecting tourism.

It is also worth paying attention to the concept of "*rural green tourism*". Researcher V.I. Byrkovych in his scientific article defines it as follows: "a specific form of recreation in private households in rural areas using the property and labour resources of a private peasant, subsidiary or farm, natural and recreational features of the area and the cultural, historical and ethnographic heritage of the region". In the context of this paper, the above term is interesting because the author includes mushroom and berry picking as additional services of this type of tourism [7].

There is a certain prospect of harmonising the collecting tourism with the previously proposed agrotourism [8]. P.A. Horishevskyi et al. define *agritourism* as "recreational tourism that involves the use of agriculture (farming)". This type of tourism, according to the authors, also provides a number of additional services in rural areas, including mushroom and berry picking [9].

Having analysed the works of Ukrainian scientists, it can be concluded that until now, tourism scholars in Ukraine do not distinguish collecting tourism as a separate phenomenon. This result of the review of the existing material is quite natural, since tourism studies is only at the beginning of its development and growth as a scientific discipline in Ukraine, so it is characterised by incompleteness and gaps in certain issues.

Researchers from other countries also distinguish mushroom tourism, but as a component of culinary tourism [10]. In Spain, mushroom tourism is organised directly, without a culinary focus, as a "wild" recreation (wild mushroom picking tourism) [11].

Chinese and Japanese scientists also distinguish *fruit-picking tourism* as a separate type of tourism [12, 13].

Methods. A descriptive method is necessary to conduct a study of collecting tourism. In the context of this work, description is a systematic characterisation of the territory and a theoretical summary of the information obtained, i.e. systematisation, explanation and verbal construction of the theory.

The next method, the method of idealisation, involves designing so-called ideal models and comparing the situation under study with the ideal version. This is a complex method, and its application takes into account the features of some other methods (modelling, analogy, abstraction, etc.). The essence of the method is the formation of ideal objects in relation to all real territorial systems and further study of territorial systems on their models, comparing "adequate" models with ideal ones. In this study, it is implemented at the classification stage to create an "ideal natural-territorial complex".

The method of classification, which overlaps with the previous one, helps to systematise existing knowledge and identify certain patterns, which is necessary for drawing logical conclusions. Thus, the original classification was developed in this study.

Another way to collect information, in particular when assessing tourist attractiveness, is to study general geographical and thematic maps (relief, climate, fauna and flora, Quaternary sediments), as well as to decipher satellite images. Thus, for this study, maps of tectonic zonation, geological and geomorphological structure, as well as satellite images and a digital elevation model of the Kharkiv region were used as auxiliary elements.

The comparative method consists in finding and identifying similarities or differences in uniform properties (signs, changes, trends) of the objects under study. For example, in this study, the comparison method was used at the stage of analysing the natural resource base of the Kharkiv region, namely, to compare its territorial communities.

The forecasting method is, in fact, current assumptions about the future in order to determine it. Thus, in this study, it is implemented when assuming which objects of interest may be of interest to a tourist-gatherer in the Kharkiv region.

Research results. Based on the above and other studies, as well as some of their own experience, the authors propose a working version of their own definition of collecting tourism. According to the authors, *collecting tourism* is a type of tourism organised for the purpose of collecting components of the natural environment for basic necessities, i.e. consumption, or satisfaction of cognitive and aesthetic needs. Thus, its hierarchically smaller taxa will be its subtypes: one – for basic necessities (this definition includes the collection of mushrooms, berries, nuts and other plants for further consumption) and the second – for cognitive and aesthetic pleasure (collecting samples of natural components (plants, mushrooms, minerals or fossils, etc.) to replenish one's own thematic collection) [14].

It is advisable to consider this type of tourist activity as one of the components of a large group of active types of tourism. Based on the fact that active tourism involves all types of tourist trips in a diverse natural environment, which are characterised by an active way of moving along the route, i.e. with the expenditure of appropriate physical efforts of the tourist, it can be argued that collecting tourism falls under this category of tourist activity, as it meets two main criteria: conducting tourist activities in the natural environment and making physical efforts of the tourist [15, 16].

The peculiarity of the authors' approach to the problem of collecting tourism is the need to introduce a certain scientific and methodological framework, without which collecting tourism as a type of ecotourism cannot be implemented in the latter's system and obtain the status of an independent type of active recreation and conscious cognitive activity. Here, we mean the need to harmonise collecting tourism with the basics of landscape science theory and determine its connection. Given the subject of this study and the lack of a theoretical framework for collecting tourism, we propose an authors' classification of natural-territorial complexes by the predominant objects of collecting based on geological and geomorphological conditions (Fig. 1). This classification is aimed at determining the territory that is most attractive to a tourist-gatherer, focusing on his/her objects of interest and relying on certain information about the territory.

The definition of territory types and subtypes is based on three geological and geomorphological conditions that are closely interrelated: exposure, nature of the parent rock and vegetation cover.

In the Hudson Institute of Mineralogy Dictionary, the term "exposure" is defined as "the nature and degree of openness of a slope or place to wind, sunlight, weather, oceanic influences, etc." [17].

In fact, according to the Small Encyclopedia of Mining, outcrops are "rock exposures on the earth's surface" [18].

For this classification, a three-stage gradation of outcrops was used, in which the following levels are distinguished:

- steep, typical for areas where the share of

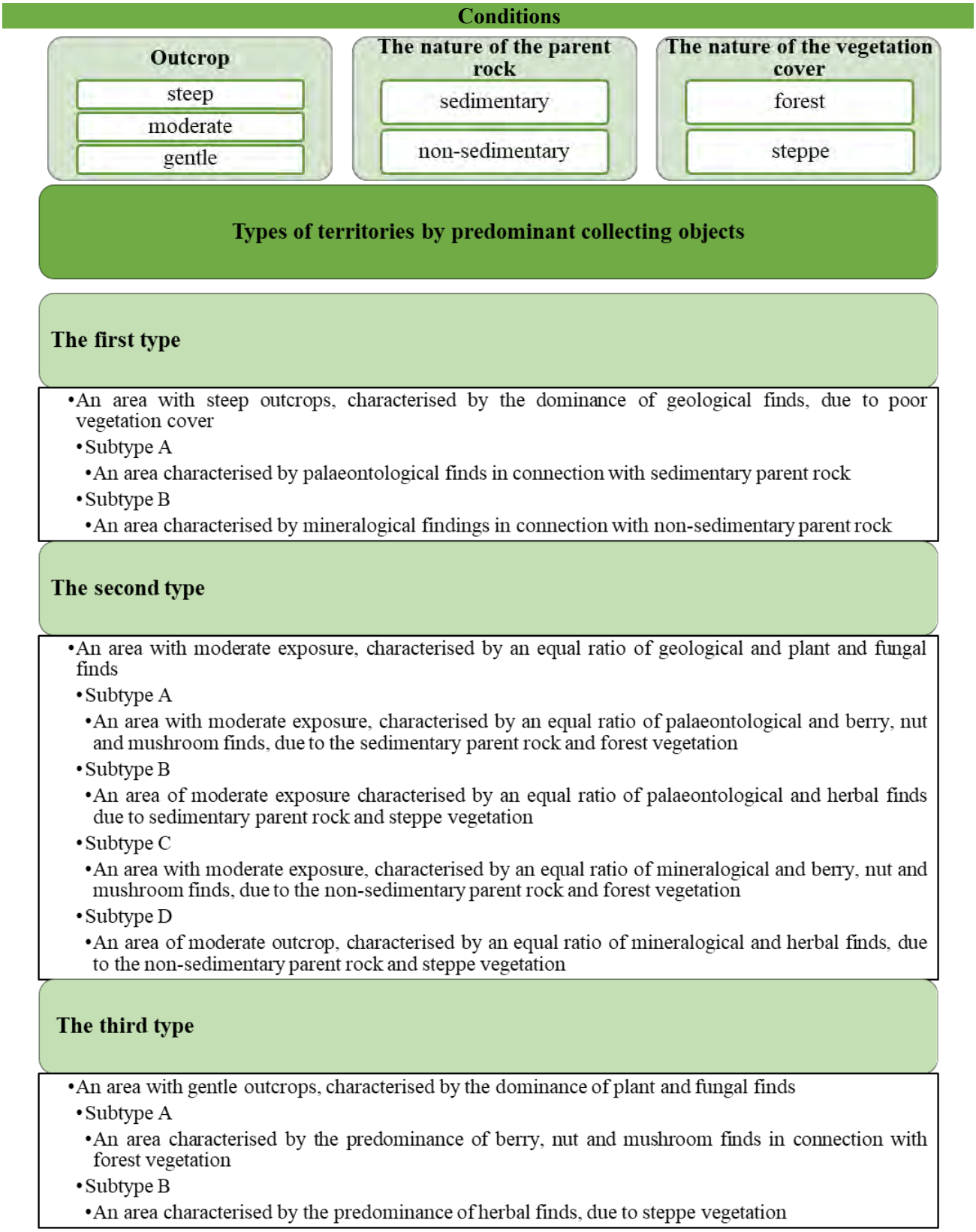


Fig. 1. Classification of natural-territorial complexes by predominant collecting objects based on geological and geomorphological conditions

outcrops is more than 70%;

- moderate, characteristic of areas where the share of outcrops is between 40 and 70%;
- gentle, characteristic of areas where the share of outcrops is less than 40% [19].

It is important to note that this study takes into account outcrops of both natural and anthropogenic origin.

The next condition is the nature of the parent rock. For this classification, we have chosen a con-

ditional division of rocks into sedimentary and non-sedimentary rocks based on the presence of palaeo-remains. Thus, in this case, non-sedimentary rocks combine igneous and metamorphic rocks, which are usually distinguished in the classification by genesis [20]. This division is necessary to characterise geological finds, which can be palaeontological or mineralogical. Paleo-remains, or fossils, include the remains of organisms of past geological epochs or traces of their vital activity preserved in sedimentary rocks; mineralogical finds include various mineral aggregates, the presence of which prevails in non-sedimentary rocks [21].

The third condition is the nature of the vegetation cover, which the authors divided into forest and steppe. This division is general and utilitarian and is based on the classification of vegetation by life forms, which mainly includes three types – woody, shrubby and herbaceous. Therefore, for this author's classification, the first and second types form the basis of forest vegetation, and the third type is steppe vegetation. It is worth noting that under these conditions, the classification should be applied only to the territories located in the natural zones of mixed forests, forest-steppe and steppe.

Thus, by combining one of the proposed options for each of the geological and geomorphological conditions – outcrop, nature of the parent rock and vegetation cover – and thus characterising a certain territory that a tourist-gatherer wishes to visit, he determines the type of gathering objects (paleontological finds, mineralogical finds; berries, nuts and mushrooms, herbs) that will prevail there.

It is also possible to use this classification in reverse: based on the desired type of gathering objects. Thus, focusing on the object of interest, the tourist-collector can determine the characteristics of the territory he needs by the classification.

Let us consider the geological and geomorphological features of the Kharkiv region as a case study. From a geological point of view, the Kharkiv region is located within the southeastern part of a large depression structure known as the Dnipro-Donetsk Depression (DDD). It has a number of zones that differ in the complexity of their structure and the depth of the crystalline basement. The central part of the depression is a large rift, the Dnipro graben.

Sedimentary Paleozoic and Mesozoic deposits, which were formed mainly in marine and lagoonal conditions (limestone, sand, clay and marl), have thick deposits in the Kharkiv region. Fossils of marine organisms, such as gastropods, can be found in their strata. In particular, Mesozoic sediments are important for understanding the natural resources and landscape features of the region. They influence hydrogeological conditions, including the location of underground water reservoirs, as well as the formation of fertile soils [22].

Cenozoic sedimentary deposits, represented by sands, clays, limestones, marls and coals, are important for understanding climate change, landscape evolution, geological history and natural resources of the region. Paleogene, Neogene and Quaternary deposits are found throughout the region in river valleys, gullies and ravines. Intrazonal alluvial deposits up to 20 m thick cover the ancient river terraces [23, 24].

The relief of the region is characterised as flat and undulating with dissected river valleys, gullies and sloping ravines. The general slope of the surface is directed to the south. Elevations vary from 236 m (in the spurs of the Middle Russian Upland northwest of Zolochiv) to 59 m (in the floodplain of the Siverskyi Donets on the border of the Kharkiv and Donetsk regions) [25].

The Kharkiv region is characterised by accumulative landforms. Thus, the region is characterised by alluvial terraced plains. The ravine and gully system is highly developed in the region, confined to river valleys. The reason for this, in addition to the lithological composition of rocks, is tectonics. Over time, the watershed areas have been affected by erosion – planar flushing [26].

To sum up, it is worth noting that the geomorphological structure of the Kharkiv region is determined by its geological features. Thus, the predominant morphosculptures in the region are water erosion forms such as river valleys, ravines and gullies. Thus, the geological and geomorphological conditions have a complex impact on the formation of the region's natural landscape mosaic.

According to the above classification, in order to determine the type of territory for the Kharkiv region by the predominant objects of collecting, it is necessary to analyse it by each of the three conditions (see Fig. 1).

According to the ecological passport of the Kharkiv region, in 2024, the area of forest land covered with forest vegetation is 4,177 km^2. Meanwhile, the total area of the region is 31,418.5 km^2 [27]. Thus, the forest cover of the Kharkiv region is 13.3%. This indicates the predominance of steppe vegetation.

As for the region's outcrop, no direct or additional official data were found. Therefore, in order to obtain indicative data, visual interpretation of Sentinel-2 satellite images was performed in an individually adjusted composite, which allowed us to more clearly distinguish between rock outcrops not covered by vegetation. It is worth noting that among the identified rock outcrops, outcrops along the river and quarry shorelines are predominant. The largest exposed areas were recorded in the Kytsivska

Desert and near the Oskil Reservoir.

The area of the digitised zones was calculated using the Calculate Geometry function in ESRI ArcGIS Desktop and came to 70.2 km^2. As a result, it was determined that the outcrop of the Kharkiv region is 0.2%. This indicates a weak outcrop of the territory.

As noted above, the territory of the study area is characterised by sedimentary rocks, which is the definition for one of the classification conditions.

Thus, after analysing the geological and geomorphological conditions of the study area, it can be argued that the Kharkiv region falls under subtype B of the third type, i.e. it is a territory with a gentle outcrop, which is characterised by the predominance of herbal finds due to the dominant steppe vegetation. In this case, when organising collecting tourism, it is the medicinal herbs that should attract the tourist's attention.

According to the ecological passport, 873 species of perennial, 95 biennial, and 188 annual herbal plants grow in the Kharkiv region, including 571 medicinal and 112 edible species [27]. The authors have compiled a list of 205 medicinal and edible herbal plants that are common in the region and are not subject to protection and therefore may become potential objects of interest for tourists.

It is worth noting that in case of reducing the scale of the territory, for example, when considering collecting tourism in the context of an administrative district, territorial community or a certain settlement, the classification subtype may change, as the indicators of forest cover and exposure will be different.

For example, the forest cover of the Slobozhanska territorial community exceeds the total forest cover of the Kharkiv region. The exposure for this area remains low. Thus, the Slobozhanska territorial community falls under subtype A of the third type – a territory with gentle exposure, which is characterised by the prevalence of berry, nut and mushroom finds, due to the dominant forest vegetation. In this case, when organising collecting tourism, the tourist's attention should be drawn to wild berries, nuts and edible mushrooms.

According to the ecological passport of the Kharkiv region, the flora of the region includes 27 species of trees, 48 species of shrubs, 26 species of bushes and semishrubs [27]. The authors have compiled lists of 23 wild plants that bear berries, 6 that produce nuts, and 200 edible mushrooms. These plants and mushrooms are common in the Kharkiv region and are not subject to protection and therefore may become potential objects of interest for tourists.

Another example concerns the Izium territorial community. Due to the concentration of large-scale rock outcrops in this area (Mount Kremenets, Velyki Kamianski Outcrops, Protopivska Gully), the value of the outcrop index increases, in addition to the predominant forest vegetation. Thus, the Izium territorial community falls under subtype A of the second type – an area with moderate exposure, which is characterised by an equal ratio of paleontological and berry, nut and mushroom finds due to the sedimentary parent rock and forest vegetation. In this case, when organising collecting tourism, the tourist's attention can be attracted by wild berries, nuts and edible mushrooms, as well as interesting paleontological remains.

In general, it can be argued that the natural resource base of the Kharkiv region, due to its geological and geomorphological circumstances, is favourable for the organisation of collecting tourism and is represented mainly by plant, fungal and paleontological potential objects of tourist interest. The predominance of certain finds will vary depending on the scale of the selected territory for organising a hike – its local geological and geomorphological situation.

Let's consider the prospects for the development of collecting tourism in the Kharkiv region. Given the above fact, at the time of writing, the territory of the Kharkiv region is improper for organising tourist gathering activities due to military operations that affect both the security and environmental aspects of tourism.

The use of military equipment and weapons contaminates all components of the environment, including the air, soil, surface and groundwater. The damage caused to the environment by military operations has a negative impact on the state of ecosystems.

To date, the number of recorded cases of potential damage to the natural environment of Ukraine is about 2,611, of which 410, the second largest number, were observed in the Kharkiv region, which directly borders the Russian Federation, the aggressor country, to the north. For example, in the 3 years between the end of May and the end of August, which is hot and dry in the region's temperate continental climate, numerous cases of large-scale fires were recorded in areas covered by meadows and forests, in particular within the Bohodukhiv, Izium, Kupiansk, Lozova, Chuhuyiv and Kharkiv districts, caused by the use of artillery and bombers [28].

At present, visiting areas where active hostilities took place or which have been subjected to even the slightest military impact in the Kharkiv region is strongly discouraged, as it poses a direct threat to life. Firstly, because of the large extent of mined territory and the risk of coming across unexploded ordnance, and secondly, because of the contamination of the environment with heavy metals and harmful gases.

Ammunition explosions release a complex mix of gaseous byproducts (such as CO, CO^2, SO^2, etc.) and heavy metals (Pb, Cd, Cu, etc.) into the environment [29, 30]. These substances settle into the soil via atmospheric precipitation or direct deposition and are subsequently absorbed by flora and fungi. This chemical contamination, combined with extensive habitat destruction, has severely compromised the future of foraging tourism in the Kharkiv region, rendering much of the territory unsafe for public use. The overall security situation is unsatisfactory. And as a result of the fires, ecosystems may well change in the future, for example, pure pine communities will be replaced by mixed ones, as only one species cannot regenerate on the burned areas. Therefore, changes will affect all components of the ecosystem, including potential tourist attractions.

In the first post-war years, the organisation of collecting tourism will only be possible in those areas of the region where active hostilities were not conducted. For areas that have been heavily impacted by the war, in addition to natural biodiversity restoration and clean-up, measures should be taken to eliminate the effects of the war and preserve ecosystems in order to restore this tourist vector.

As for the general features of organising tourism for the purpose of collecting, it is worth starting with route planning. When planning a route for the needs of collecting tourism, the following aspects should be analysed and taken into account: 1. *Season choice*. Different seasons are characterised by different weather conditions, which in one way or another affect the comfort of the trip. Seasonal weather patterns significantly influence road accessibility, as heavy precipitation in spring and autumn can render unpaved trails and forest paths impassable. Consequently, a thorough analysis of local climatic conditions and seasonal route viability is essential. A tourist's success in finding specimens, as well as their overall comfort and experience, is dictated by these environmental factors. Furthermore, the phenology of plants and fungi – the primary focus of the collecting tourism – is strictly tied to seasonal growth cycles.

2. *Conservation status of the territory*. Selecting a destination requires a comprehensive understanding of the legal protections governing Ukrainian land. When a route enters the Nature Reserve Fund (NRF) of Ukraine, visitors must adhere to strict regulations that scale with the territory's conservation status.

According to the Law of Ukraine "On the Nature Reserve Fund of Ukraine," the extraction of medicinal plants or fruits is permitted only if such activities do not compromise the conservation goals or the reproductive capacity of the ecosystem. The restrictions are categorized as follows: in Natural and Biosphere Reserves foraging is strictly prohibited in these core zones to maintain peak biodiversity, with rare exceptions made only for specific anthropogenic buffer zones; in National Nature Parks (NNP) and Regional Landscape Parks regulations are site-specific. For instance, Synevyr NNP in the Zakarpattia region allows for the sustainable harvesting of mushrooms for personal use (excluding red-listed species). Conversely, Holosiyivskyi NNP n Kyiv enforces a total prohibition on all foraging activities to protect the urban forest ecosystem [31, 32].

In the context of National Nature Parks, the collection of natural resources is not a general liberty but a strictly regulated activity. A notable example is Homilsha Woods National Nature Park, where mushroom harvesting is permitted only under specific administrative oversight.

According to the official "Rules for Visiting", which were mandated by the Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine (Order No. 135, dated May 13, 2016), any gathering of mushrooms or berries is contingent upon obtaining formal permission from the park's management. Furthermore, collectors must operate in strict accordance with environmental protection protocols. The law explicitly forbids these activities within "high-protection zones" – areas specifically designated to safeguard rare, threatened, or endangered flora and fauna. In these sensitive habitats, maintaining the ecological balance takes absolute priority over any foraging interests [33].

A more rigorous set of restrictions applies to Nature Reserves, which represent the most protected category within Ukraine's Nature Reserve Fund. These areas operate under a "special protection regime" designed to maintain ecosystems in their pristine state.

Under this legal framework, all forms of economic activity or resource extraction that could negatively impact the natural complex are categorically prohibited. Consequently, foraging and collecting activities are entirely banned within the boundaries of nature reserves. This prohibition serves a dual purpose: first, to prevent direct physical harm to the ecosystem, and second, to minimize the overall anthropogenic footprint. By restricting human interference, the law ensures that these territories remain undisturbed as vital benchmarks of natural biodiversity [34].

3. *Tourist safety*. When designating a specific territory for a route, the paramount consideration must be the safety and physical security of the participants. A comprehensive evaluation of the landscape is necessary to identify and bypass potentially hazardous zones. These include: geomorphological hazards (geologically unstable areas, such as coastal erosion zones or active mountain slopes prone to

landslides and rockfalls, pose significant physical risks to tourists) and anthropogenic contamination (foraging activities must be strictly excluded from ecologically compromised locations which includes the vicinity of landfills, active or abandoned industrial zones, and areas surrounding manufacturing facilities where the soil and air may carry high concentrations of pollutants).

Given the inherent unpredictability of the natural environment, tourists must possess a high degree of situational awareness and specialized knowledge. Safety in the wilderness is not merely about location but also about behavioral competence. It is critical for individuals to be educated on the specific protocols for interacting with or avoiding wild animals to prevent aggressive encounters. Strategic planning should include a clear framework for actions to be taken during unforeseen emergencies, ranging from sudden weather shifts to medical incidents. Adhering to established codes of conduct for open terrain ensures not only the personal safety of the tourist-collector but also minimizes the impact on the environment, ensuring that the expedition remains both safe and sustainable.

4. *Pollution of the territory*. This aspect is closely linked to the general safety of the route, yet it requires a deeper analysis of both direct and indirect health risks. While immediate physical hazards are a concern, the long-term chemical risks associated with foraging are often more insidious.

When designing a route for gathering-based tourism, it is imperative to bypass areas characterized by significant anthropogenic pressure. These high-risk locations include: waste and industrial sites (landfills, chemical waste dumps, and active industrial zones), post-disturbance landscapes (areas affected by wildfires (burned areas) where chemical compositions in the soil may have shifted), and agricultural and infrastructure zones (intensively cultivated fields (due to pesticide and fertilizer runoff) and roadsides with high traffic volume (due to exhaust emissions and heavy metal deposition)). The necessity of avoiding these areas stems from the unique biological properties of flora and fungi. Plants and mushrooms function as highly efficient biological filters, possessing the capacity to absorb and concentrate various substances from their surrounding environment. This process of bioaccumulation means that they often harbor toxic compounds – such as heavy metals and synthetic pollutants – at levels far exceeding those found in the soil itself.

Consequently, a tourist who consumes or even handles specimens from contaminated zones inadvertently ingests hazardous substances. These toxins are particularly dangerous because they tend to be cumulative, building up in the human body over time and potentially leading to chronic health issues long after the initial exposure.

In the process of collecting tourism, a person directly interacts with all the components of nature that are the objects of his or her attention. It is well known that tourists always have different levels of experience. In the case of this tourist activity, the collectors need to be familiar with the objects of interest. For example, tourists can study and take thematic reference books with them on a hike in advance to recognise species of plants, mushrooms, shellfish, etc.

With the development of technology, there are apps that can replace paper guides. One of them is the “Seek” mobile app, which is a mobile supplement to the “iNaturalist” app, a joint initiative of the California Academy of Sciences and the National Geographic Society [35]. The interface of both the “Seek” app and the “iNaturalist” app is quite user-friendly and will be understandable to tourists of all ages and backgrounds.

The main purpose of using this mobile application in the context of collecting tourism is to recognise biodiversity species. It is important to note that the recognition accuracy is quite high, as the computer vision model includes 15,798 species and 12,524 broader taxonomic groups such as kingdom, type, class, order, family and genus.

To use the application, users need a smartphone with a working camera. This software is installed on iOS and Android operating systems, which makes it possible for a wide range of people to use it. To identify a species, you need to point the smartphone camera, which is turned on within the app, at a living object and wait for the specific name to appear. After that, the user takes a photo of the object and receives an information note, which includes a photo taken by the user, a photo example, the name of the species in Latin, the date of the study, the area of distribution, the taxonomic series, the number of similar studies in the world published in “iNaturalist”, and the seasonality of the recorded studies. All studies are stored in the app and the user can view them at any time. Using the “Seek” app, anyone can publish a species study in the “iNaturalist” environment, thereby enriching the public information base.

An important advantage of this application is its combination with Google Maps. In addition to orientation on the ground, a tourist can use the web map to view species that have already been studied within their location and beyond.

The use of this application in the process of collecting tourism is appropriate, as it greatly facilitates the process of identifying objects of tourist interest, namely representatives of plants, mushrooms or mollusks, and also provides automatic geo-referencing, thanks to connection with the GPS module built into the smartphone. Of course, it is

also worth noting the problematic issues that may arise during use, namely the definition of a biodiversity unit at higher taxonomic levels, i.e. the difficulty of defining it to the species level. The reason for this may be the lack of research on the territory where the hike is planned.

If we talk about the sources of information that should be used in the development of tourist collecting routes, the following should be considered (Table 1).

Thus, in the authors' opinion, the above-mentioned recommendations will help to develop a quality route for the organisation of collecting tourism.

Table 1

Sources of Information for Developing Collecting Tourism Routes

Source	Purpose	Example
Thematic cartographic materials	For accurate route plotting	Topographic maps, landscape maps, vegetation cover maps
Manuals and reference books	To specify the object of collection	"Mushrooms of Ukraine. Atlas-Reference Book", "Complete Atlas of Medicinal Plants", "Wild Fruits and Berries", "Minerals of Ukraine"
Object websites	To clarify the tourist's authority in a certain area	Websites of national nature parks
Earth remote sensing data	For monitoring the current situation in the area	Satellite images, meteorological indicators
Mobile applications	To specify the object of collection and monitor the extent to which the area has been studied by other tourists	"Seek by iNaturalist"

The modern consumer significantly differs from the consumer of 20-30 years ago, as the former is already very familiar with modern technologies and strives to involve them in all spheres of their life. Thus, the tourism sector is no exception.

Geographic Information Systems (GIS) provide the user with a wide range of possibilities because they allow for the uploading, arrangement, and combining of a large amount of different information. That is why the development of visualization for the needs of tourism, including collecting tourism, in a GIS environment opens up new opportunities.

As an example of such a tool, the Google My Maps platform can be noted. The technical capabilities allow the developer to plot the desired route and at the same time see the area in full, choosing a satellite image as the geographical base of the map. A standard map or a relief map can also be chosen as a base option.

When adding points, the developer has a wide selection of pins and colors for them, which makes it possible to distinguish points on the route and navigate their theme. The ability to add a short description and photos to the point, which increases the level of visibility, is an equally important function.

Such a map can contain several routes at once, which undoubtedly illustrates the advantage of using a geographic information system. The user can display or hide routes, by clicking on the corresponding buttons in the map's legend, and thus see the complete picture.

This platform provides the ability to print a map with the constructed route, which is very convenient in case a paper copy of the map is needed.

Another example of a platform for route visualization is ThingLink – an online environment for creating interactive virtual tours, which is a kind of representative of geographical information technology. If Google My Maps is an example of a more classic map-creation product, ThingLink looks more innovative and engaging for the user.

It is worth starting the description by noting that in this program, the user can choose not only a geographical base (a map or a satellite image) but also a photograph as the background (Fig. 2). This capability, in the authors' opinion, increases the level of visibility for the user regarding the area of the future hike.

In the ThingLink environment, as in the previously described platform, the author has a wide selection of pins and colors for them when adding po-



Fig. 2. Example of tourist route visualization using ThingLink

ints. Additionally, the developer has a wide range of tools for additional functions for the points. Thus, besides the standard addition of an image and a description, there is an opportunity to add an active button, to which a website can be linked. This function can be used to link to detailed information about the demonstrated object, for example, in the iNaturalist database.

This program, in contrast to Google My Maps, allows for the addition of video and audio materials, which can also create a positive influence for the completeness of the picture.

Given the unusual interface of the ThingLink platform, which is aimed at making the content more visually appealing and more interactive, it can be concluded that it is optimally used as a form of reporting, filled with photo materials.

The only factor that, in the authors' opinion, may have a negative effect on the user is that the route points in the ThingLink environment change one after another in the form of separate scenes, and not standard points on a map, as in Google My Maps. However, the route developer can visualize the points, using a familiar map or satellite image as a base, to neutralize this aspect and not "scare away" the potential user.

Thus, it can be concluded that dynamic and polyfunctional tourist routes, created on modern platforms using geographic information systems and technologies, are promising for use in the needs of collecting tourism, as they provide a number of additional opportunities to the potential user, in contrast to static paper maps.

Conclusions. 1. Theoretical material regarding the conceptual and terminological base of collecting tourism has been analyzed. This revealed that both domestic and foreign tourism studies, due to their rather short development process, do not define "collecting tourism" as a separate phenomenon in tourism, and accordingly – do not provide a definition of the term or a place in classifications. Therefore, the authors proposed and substantiated their own vision of the place of collecting tourism in the scientific system in order to fill this gap.

2. Geological and geomorphological features and the natural resource base of the Kharkiv region were studied in the context of collecting tourism Establishing that the most common objects of interest for a collecting tourist are medicinal herbs, however, the dominance of one object over others may change depending on the scale of the chosen territory.

3. Peculiarities of the organisation of collecting tourism were investigated. As a result, recommendations for constructing a collecting tourist route were developed, which take into account the specificity of the narrow focus and provide an opportunity to obtain a quality final product.

4. Prospects for the development of collecting

tourism in the Kharkiv region were examined. It was found that the region has a promising, natural resource base, but currently, conducting collecting tourist activities within the studied territory is impossible due to the negative impact of military actions.

5. The possibilities of Google My Maps and ThingLink programs as means for visualizing collecting tourist routes were analyzed. Similar and distinguishing features of the aforementioned platforms were determined, as well as the advantage of geographic information systems and technologies over paper cartographic materials in this aspect.

In summary, it can be added that the geological and geomorphological conditions of the territory play an important role in the formation of the resource base for collecting tourism. And this type of tourism itself is a promising form of recreation. Despite the fact that this direction lacks a theoretical foundation, it has potential and is in demand among "wild" tourists. However, a scientific approach will allow for a better study of this phenomenon in tourism, conducting new research, monitoring, and ultimately creating a data bank, which will allow for the combination of fundamental and applied aspects of study.

Bibliography

1. *Hussain, S. T., Muhammad, S., Khan, S., Hussain, W., & Pieroni, A. (2023). Ethnobotany for food security and ecological transition: wild food plant gathering and consumption among four cultural groups in Kurram District, NW Pakistan. Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine, 19(1), 35. https://doi.org/10.1186/s13002-023-00607-2.*
2. *de Jong, A., & Varley, P. (2018). Foraging tourism: critical moments in sustainable consumption. Journal of Sustainable Tourism, 26(4), 685-701. https://doi.org/10.1080/09669582.2017.1384831*
3. *Svizzero, S. (2016). Foraging wild resources and sustainable economic development. Journal of Economics and Public Finance, 2(1), 132-153. https://doi.org/10.22158/jepf.v2n1p132.*
4. *Тарановський, В., Ковальов, Б., & Портянка, А. (2014). Науково-методичні підходи до визначення дефініції "екотуризм". Механізм регулювання економіки, 64(2), 30-37. https://mer-journal.sumy.ua/index.php/journal/article/view/488.*
5. *Мельнійчук, М., Безсмертнюк, Т. (2016). Підходи до класифікації туристсько-рекреаційної діяльності в межах природно-заповідного фонду. Науковий вісник Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки. Серія: Географічні науки, 340(5), 106-111. https://evnuir.vnu.edu.ua/handle/123456789/15267.*
6. *Кляп, М., & Шандор, Ф. (2011). Сучасні різновиди туризму : навчальний посібник. Видавництво Знання.*
7. *Биркович, В. (2008). Сільський зелений туризм – пріоритет розвитку туристичної галузі України. Стратегічні пріоритети. Науково-аналітичний щоквартальний збірник, 1 (6), 138-143.*
8. *Рак, В., Антоненко, Т., & Голікова, Т. (2017). Агротуризм як напрям розвитку індустрії гостинності в Україні. Науковий погляд у майбутнє, 4(06-04), 79-85. https://doi.org/10.30888/2415-7538.2017-06-04-024.*
9. *Горішевський, П., Васильєв, В., & Зінько, Ю. (2003). Сільський зелений туризм: організація надання послуг гостинності. Видавництво Місто НВ.*
10. *Mushroom Tourism. (б.д.). Planeta.com – Global Journal of Practical Ecotourism. Mushroom Tourism. https://www.planeta.com/mushroom-tourism/.*
11. *Wild mushroom picking tourism. (б.д.). Silvestres Ezcaray. https://silvestresezcaray.com/en/activities/wild-mushroom-picking-tourism/.*
12. *Fruit Picking. (б.д.). Japan National Tourism Organization. https://www.japan.travel/en/ph/fruit-picking/.*
13. *Liu, J., Chen, F., Ge, Q., & Li, Y. (2016). Climate change and fruit-picking tourism: Impact and adaptation. Advances in Meteorology, 2016, 1-11. https://doi.org/10.1155/2016/9783646.*
14. *Borysenko, K., & Dovzhenko, P. (2022). The use of geographic information systems in combination with mobile applications for the needs of collecting tourism. International Conference of Young Scientists "Modern Problems of Earth Sciences" Proceedings (p. 122-124). Publish House of Iv. Javakhishvili Tbilisi State University.*
15. *Деребчинська, А. (2015). Розвиток активного туризму в Україні. У Матеріали III Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні тенденції розвитку туризму» (с. 27-30). ВП «МФ КНУКІМ».*
16. *Кифяк, В. (2003) Організація туристичної діяльності в Україні. Навчальний посібник. Книги-ХХІ.*
17. *Definition of exposure. (б.д.). Mindat.org – Mines, Minerals and More. https://www.mindat.org/glossary/exposure.*
18. *Білецький, В. (Ред.). (2004). Мала гірнича енциклопедія (Т. 1). Донбас.*
19. *Характер відслоненості районів зйомки. (б.д.). Studopedia. https://studopedia.com.ua/1_290095_harakter-vidslonenosti-rayoniv-zyomki.html.*
20. *Свинко, Й., & Сивий, М. (2003). Геологія: Підручник. Либідь.*
21. *Вовк, В. (2012). Геологічний словник: для студентів вищих навчальних закладів. КОД.*
22. *Космачов, В., & Космачова, М. (2021). Естетично-привабливі місцевості Харківщини як об'єкти геотуризму. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (54), 70-82. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-54-05.*
23. *Авраменко, А., Бабіч, А., Гвоздь, Н. та ін. (1991). Географічна база "Гайдари": Навчальний посібник. Видавництво Харківського державного університету.*
24. *Інженерно-геологічні умови Харківської області. (б.д.). Геодезичні роботи, інженерна геологія для фундаменту, топографічна зйомка від фірми ГЕОТОП ІНЖИНІРИНГ по Україні. https://geotop.com.ua/injenerno-geologicheskie-usloviya-xarkovskoy-oblasti_en.php.*
25. *Космачова, М. (2009). Геологічні пам'ятки природи Харківщини як об'єкти наукової діяльності. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (30), 58-61.*

26. Палієнко, В. (2001). Акумулятивні форми рельєфу. У І. Дзюба (Ред.), Енциклопедія Сучасної України: онлайн-версія. Інститут енциклопедичних досліджень НАН України. https://esu.com.ua/article-43554.
27. Екологічний паспорт Харківської області – 2024 рік. (б.д.). Харківська обласна військова адміністрація. https://kharkivoda.gov.ua/content/documents/1327/132692/Attaches/ekologichniy_pasport_2024_rik.pdf.
28. Випадки потенційної шкоди довкіллю, спричинені російською агресією [інтерактивна мапа]. (б.д.). Екодія. https://en.ecoaction.org.ua/warmap.html.
29. Кочанов, Е., & Товстий, Ю. (2013). Оцінка стану ґрунтів територій військових об'єктів що передаються в народне господарство. У Матеріали IX Всеукраїнських наукових Таліївських читань. Охорона довкілля (с. 85-88). Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна.
30. Одосій, Л., Стаднічук, О., Свідерок, С., Надала, О., & Гичко, О. (2015). Вплив техногенного навантаження військової діяльності на стан ґрунтово-водного середовища. Військово-технічний збірник, (12), 91-96. https://doi.org/10.33577/2312-4458.12.2015.91-96
31. Офіційний сайт Національного природного парку «Синевир». (б.д.). https://synevyr-park.in.ua/.
32. Офіційний сайт Національного природного парку «Голосіївський». (б.д.). https://nppg.gov.ua/.
33. Офіційний сайт Національного природного парку «Гомільшанські ліси». (б.д.). http://gomilsha.org.ua/.
34. Закон України «Про природно-заповідний фонд України». (б.д.). Законодавство України. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2456-12#Text.
35. iNaturalist (б.д.). https://www.inaturalist.org/.

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

References

1. Hussain, S. T., Muhammad, S., Khan, S., Hussain, W., & Pieroni, A. (2023). Ethnobotany for food security and ecological transition: wild food plant gathering and consumption among four cultural groups in Kurram District, NW Pakistan. Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine, 19(1), 35. https://doi.org/10.1186/s13002-023-00607-2.
2. de Jong, A., & Varley, P. (2018). Foraging tourism: critical moments in sustainable consumption. Journal of Sustainable Tourism, 26(4), 685–701. https://doi.org/10.1080/09669582.2017.1384831.
3. Svizzero, S. (2016). Foraging wild resources and sustainable economic development. Journal of Economics and Public Finance, 2(1), 132-153. https://doi.org/10.22158/jepf.v2n1p132.
4. Taranovskyi, V., Kovalov, B., & Portianka, A. (2014). Scientific and methodological approaches to defining of the term of "ecotourism". Mechanism of an Economic Regulation, 64(2), 30-37. https://mer-journal.sumy.ua/index.php/journal/article/view/488. [in Ukrainian]
5. Melniychuk, M., Bezsmertniuk, T. (2016). Approaches to the classification of tourism and recreational activities within the Nature Reserve Fund. Scientific Bulletin of the Lesya Ukrainka Eastern European National University. Series: Geographical Sciences, 5(340), 106-111. https://evnuir.vnu.edu.ua/handle/123456789/15267. [in Ukrainian]
6. Kliap, M., & Shandor, P. (2011). Modern varieties of tourism: a textbook. Znannia. [in Ukrainian]
7. Byrkovych, V. (2008). Rural green tourism – a priority for the development of the tourist industry of Ukraine. Strategic priorities, 1(6), 138-143. [in Ukrainian]
8. Rak, V., Antonenko, T., & Golikova, T. (2017). Agroturism as new approach in hospitality industry in Ukraine. Scientific Look into the Future, 4(06-04), 79-85. https://doi.org/10.30888/2415-7538.2017-06-04-024. [in Ukrainian]
9. Horishevsky, P., Vasyliev, V., & Zinko, Yu. (2003). Rural green tourism: organisation of hospitality services. Misto NV. [in Ukrainian]
10. Mushroom Tourism. (n.d.). Planeta.com – Global Journal of Practical Ecotourism. Mushroom Tourism. https://www.planeta.com/mushroom-tourism/.
11. Wild mushroom picking tourism. (n.d.). Silvestres Ezcaray. https://silvestresezcaray.com/en/activities/wild-mushroom-picking-tourism/.
12. Fruit Picking. (n.d.). Japan National Tourism Organisation. https://www.japan.travel/en/ph/fruit-picking/.
13. Liu, J., Chen, F., Ge, Q., & Li, Y. (2016). Climate change and fruit-picking tourism: Impact and adaptation. Advances in Meteorology, 2016, 1-11. https://doi.org/10.1155/2016/9783646.
14. Borysenko, K., & Dovzhenko, P. (2022). The use of geographic information systems in combination with mobile applications for the needs of collecting tourism. International Conference of Young Scientists "Modern Problems of Earth Sciences" Proceedings (p. 122-124). Publish House of Iv. Javakhishvili Tbilisi State University.
15. Derebchynska, A. (2015). Development of active tourism in Ukraine. In Materials of the III All-Ukrainian scientific and practical conference "Modern trends in tourism development" (c. 27-30). VP "MF KNUKIM". [in Ukrainian]
16. Kyfiak, V. (2003) Organisation of tourist activity in Ukraine. Textbook. Knyhy-XXI. [in Ukrainian]
17. Definition of exposure. (n.d.). Mindat.org – Mines, Minerals and More. https://www.mindat.org/glossary/exposure.
18. Biletsky, V. (Ed.). (2004). Small Mining Encyclopedia (Vol. 1). Donbas. [in Ukrainian]
19. Nature of exposure of survey areas. (n.d.). Studopedia. https://studopedia.com.ua/1_290095_harakter-vidslonenosti-rayoniv-zyomki.html. [in Ukrainian]
20. Svynko, Y., & Syvyi, M. (2003). Geology. Lybid. [in Ukrainian]
21. Vovk, V. (2012). Geological Dictionary: for students of higher educational institutions. KOD Publishing. [in Ukrainian]
22. Kosmachov, V., & Kosmachova, M. (2021). Aesthetic-remarkable localities of Kharkiv region as geotourism objects. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (54), 70-82. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-54-05. [in Ukrainian]

23. *Avramenko, A., Babich, A., Gvozd, N. et al. (1991). Geographical base "Gaidary": Textbook. Publishing house of Kharkiv State University.*
24. *Engineering-geological conditions of the Kharkiv region. (n.d.). Geodetic works, engineering geology for the foundation, topographic surveying from the company Geotop Engineering in Ukraine. https://geotop.com.ua/injenerno-geologicheskie-usloviya-xarkovskoy-oblasti_en.php. [in Ukrainian]*
25. *Kosmachova, M. (2009). Geological monuments of nature of the Kharkiv region as objects of scientific activity. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (30), 58-61. [in Ukrainian]*
26. *Palienko, V. (2001). Accumulative landforms. In I. Dziuba (Ed.), Encyclopedia of Modern Ukraine: online version. Institute of Encyclopedic Research of NAS of Ukraine. https://esu.com.ua/article-43554. [in Ukrainian]*
27. *Ecological passport of the Kharkiv region – 2024. (n.d.). Kharkiv Regional Military Administration. https://kharkivoda.gov.ua/content/documents/1327/132692/Attaches/ekologichniy_pasport_2024_rik.pdf. [in Ukrainian]*
28. *Potential environmental impacts caused by Russian aggression in Ukraine [Interactive map]. (n.d.). Ecoaction – Center for Environmental Initiatives. https://en.ecoaction.org.ua/warmap.html. [in Ukrainian]*
29. *Kochanov, E., & Tovsty, Y. (2013). Assessment of the state of soils in the territories of military facilities transferred to the national economy. In Materials of the 9th All-Ukrainian Scientific Taliiv Readings. Environmental Protection (p. 85-88). V.N. Karazin Kharkiv National University. [in Ukrainian]*
30. *Odosiy, L. I., Stadnichuk O. M., Sviderok, S. M., Nadala, O. S., & Gychko, O. S. (2015). Influence of man-made load military activity on the soil-water environment. Military Technical Collection, (12), 91-96. https://doi.org/10.33577/2312-4458.12.2015.91-96. [in Ukrainian]*
31. *Official website of the National Nature Park "Synevyr". (n.d.). https://synevyr-park.in.ua/. [in Ukrainian]*
32. *Official website of the National Nature Park "Holosiivskyi". (n.d.). https://nppg.gov.ua/. [in Ukrainian]*
33. *Official website of the National Nature Park "Gomilsha". (n.d.). http://gomilsha.org.ua/. [in Ukrainian]*
34. *Law of Ukraine "On the Nature Reserve Fund of Ukraine". (n.d.). Legislation of Ukraine. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2456-12#Text. [in Ukrainian]*
35. *iNaturalist (n.d.). https://www.inaturalist.org/.*

Збиральницький туризм: на прикладі Харківської області, Україна

Поліна Довженко [1]
аспірантка кафедри фізичної географії та картографії
[1] Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна;
Катерина Борисенко [1]
к. пед. н., доцент кафедри фізичної географії та картографії;
Владислав Попов [1]
старший викладач кафедри фізичної географії та картографії;
Саймон М. Хатчінсон [2]
д. філософії (географія), доцент факультету природничих наук, інженерії та навколишнього середовища
[2] Університету Солфорду, Солфорд, Велика Британія

У даній роботі наведено теоретичне обґрунтування визначення збиральницького туризму, яке є авторським варіантом у робочому вигляді. Також представлено розроблену класифікацію природно-територіальних комплексів за переважаючими об'єктами збиральництва з урахуванням ступеню відслоненості та характеру рослинного покриву ділянки, актуальну для природних умов території України. Наведено приклади застосування цієї класифікації на різних рівнях територіальної організації: для усієї Харківської області та її територіальних громад (Ізюмської МТГ і Слобожанської СТГ). Запропоновано визначення місця збиральницького туризму у системі активних видів туризму. Розроблено комплекс практичних рекомендацій щодо планування збиральницьких туристичних маршрутів, які включають обов'язкове врахування умов сезонності, природоохоронного статусу обраної території, умов загальної безпеки для туриста та, особливо, ризику забрудненості рослин і грибів, як об'єктів інтересу туриста-збиральника, токсичними речовинами унаслідок антропогенного впливу. Проаналізовано перспективи розвитку збиральницької туристичної діяльності в досліджуваному регіоні. Виявлено, що станом на 2025 рік організація такої туристичної активності на значній частині території Харківської області є неможливою та небезпечною внаслідок вже завданого та потенційного негативного впливу воєнних дій, спричинених повномасштабним вторгненням Російської Федерації на територію України, а відновлення даного туристичного вектору можливе лише після стабілізації безпекової ситуації та проведення заходів із очищення та відновлення уражених територій. Для підвищення якості організації збиральницького туризму проаналізовано можливості географічних інформаційних систем (ГІС) та технологій. Рекомендовано звернути увагу на використання мобільного додатку Seek від iNaturalist для точного розпізнавання видів рослин і грибів, а також цифрових веб-платформ Google My Maps і ThingLink для створення динамічних, багатофункціональних та інтерактивних візуалізацій туристичних маршрутів.

Ключові слова: *збиральницький туризм, ландшафт, географічна інформаційна система (ГІС), карта, туристичний маршрут, Харківська область.*

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу
Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 3 жовтня 2025 р.
Прийнята 20 листопада 2025 р.

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-15
UDC 911.3:314.18:330.35
Received 13 June 2025
Accepted 17 November 2025

The relationship between population growth and economic growth in Egypt: A geographical perspective

Ahmed Fouad Elmoughazi
Associate Professor of Population Geography,
Department of Geographical Studies and Research,
Afro-Asian Institute, Suez Canal University, Ismailia, Egypt,
e-mail: elmoughazi@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-6322-6160

ABSTRACT

The population is one of the most important factors of production, and its characteristics determine whether population growth is a blessing that enhances the state's competitiveness or a burden that strains resources and the environment. There are five perspectives regarding the relationship between population growth and economic growth, which are: Population growth does not contribute to economic growth, Population growth stimulates economic growth, The population effect is neutral, interrelationship, and The relationship changes over time. In Egypt, the correlation between population growth and economic growth is highly significant; the first rate reflects the increase in the size of the population, while the other rate reflects the economic aspect, as well as the growing concern regarding the dangers of population increase on economic growth in Egypt.

Purpose: The study intends to explore the correlation between population growth and economic growth in Egypt from 1993 to 2023, with a specific focus on the various governorates in 2023; Determining the impact of population growth on economic growth in Egypt during the period 1993-2023, And how have the rates of economic growth and population growth changed in Egypt, the optimal population size for Egypt, and the limits of the relationship between the annual population growth rate and the economic growth rate.

Research methods: The study followed an objective and historical approach, in addition to descriptive and cartographic methods, as well as statistical methods. The data used in this study's statistical analysis were obtained from the Egypt Demographic and Health Survey 2014 (EDHS), Egypt Family Health Survey 2021(EFHS), the Ministry of Planning, Economic Development, and International Cooperation, and CAPMAS 2017. Every governorate in Egypt is covered under the current study.

Research results: The study revealed that the current population growth rate in Egypt is 1.90%, which requires an economic growth rate exceeding 5.7% annually for citizens to reap the benefits of development; however, the economic growth has not reached this level. The study revealed that there is a strong inverse correlation (-0.938*) between the population growth rate and the economic growth rate, especially Upper Egypt governorates are the most in need of care.

Recommendations: It recommended the necessity of working on three pillars. The first is the population, through supporting the national strategy for population and development in Egypt (2023 - 2030) and controlling the population growth rate. The second is to work on increasing the economic growth rate, especially in the underprivileged governorates that suffer from a high population growth rate and a low economic growth rate, such as the Red Sea Governorate, Marsa Matrouh Governorate, Assiut Governorate, Minya Governorate, and Fayoum Governorate. The third is to work on integrating the economic dimension with the population dimension.

***Keywords**: Governorates of Egypt, population growth, economic growth, economic development, Optimal Population Size, population trap, Correlation coefficient, Dalton's Equation, High-Risk Governorates.*

In cites: Elmoughazi Ahmed Fouad (2025). The relationship between population growth and economic growth in Egypt: A geographical perspective. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 197-210. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-15

Introduction

The demographic factor plays a crucial role in the development of any country, largely determining the pace of economic growth and the level of well-being of the population, and has established it as a key driver of both social and economic development [1]. In Egypt, the demographic transition has passed through several distinct historical stages, reflecting changes in birth rates, death rates, and population growth. The first stage, from 1917 to 1946. The second stage was the beginning of the transition (between 1947 and 1986). 1990 marked the onset of the third stage of demographic transition (from the 1990s until now), and if family planning policies continue and education and health levels improve, Egypt is expected to enter the fifth stage (post-demographic transition), characterized by a clear decline in birth rates to replacement level, stabilization or significant slowdown in population growth, an increase in the proportion of elderly people, and challenges in the labor market and social protection [2].

The study of the relationship between the population growth rate and the economic growth rate is an important issue. The first-rate reflects the increase in the size of the population in any country, while the other rate reflects the economic aspect of the country [3].

The main objective of any country is to achieve economic growth and improve the standard of living for its citizens. Economic growth is defined as an increase in a country's gross domestic product (GDP) or gross national income (GNI), which results in a rise in real per capita income over time [4].

© Elmoughazi Ahmed Fouad, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

The population is one of the most important factors of production, and its characteristics determine whether population growth is a blessing that enhances the competitiveness of the state or a burden that strains resources and the environment [5].

The historical progression of thought regarding the relationship between population growth and economic development shows that in the 1950s and 1960s, there was a prevailing belief that rapid population growth would negatively impact the economy. By the late 1970s, the perspective shifted to suggest that a surplus of labor in developing countries could actually impede economic growth. By the end of the 1980s, population growth was no longer seen as a direct cause of shortages in food or natural resources. Instead, it became recognized as a potential factor contributing to a slowdown in economic growth. Additionally, demographic changes began to be understood not only as a cause of economic changes but also as a consequence of them [6].

Study Objective: The study aims to determine the relationship between population growth and economic growth in Egypt during 1993 to 2023, and at the governorates in the year 2023.

Importance of the Study: The importance of the study lies in the impact that the population growth rate has on the economic growth rate in Egypt during 1993 to 2023, as well as the growing concern regarding the dangers of population increase on economic growth in Egypt.

Study Problem: Determining the impact of population growth on economic growth in Egypt during the period 1993-2023. From this, the study problem can be formulated into the following questions:

- How have the rates of economic growth and population growth changed in Egypt?
- What is the optimal population size for Egypt?
- What are the limits of the relationship between the annual population growth rate and the economic growth rate?

Study Hypothesis: The study is based on the hypothesis that population growth in Egypt during the study period has a significant impact on economic growth.

1. Main intellectual trends regarding the relationship between population growth and economic growth

The study of the relationship between population growth and economic growth has a rich historical record in the field of economics. However, there remains a disagreement regarding the forms of impact that population growth has on economic growth [7]. Studies have not reached definitive conclusions about whether population growth has positive, negative, or neutral effects on economic growth, as there are five main intellectual trends regarding the relationship between population growth and economic growth;

The first is the traditional (Malthusian) view, which argues that high population growth leads to a decline in economic growth, as it creates pressures on natural resources, reduces private and public capital formation [8]. It also significantly increases the demand for goods and services among individuals, thereby reducing their savings intended for investment purposes, increasing government expenditures on essential services such as education, health, transportation, protection, security, and housing, and raising unemployment rates, particularly among the educated. This is accompanied by a noticeable decrease in wage levels in both the public and private sectors, rising housing prices due to the difficulty in meeting the needs of new families, urban encroachment on agricultural land and the resulting problems, in addition to the collapse of public utilities due to the pressure placed on them [9].

While some researchers mention that population growth negatively impacts economic growth, others point out that population growth positively contributes to economic growth [10]. This second viewpoint which suggests that a high population growth rate increases the stock of human capital, resulting in a larger workforce that boosts economic growth [11]. Additionally, population growth can stimulate technological development and innovation, enhance the benefits of large-scale economies, and increase the number of creative individuals and those with exceptional abilities who can drive transformative changes in the future.

While the third viewpoint supports the neutrality of population impact, it states that the effect of demographic factors on economic growth is unclear, due to reliance solely on the annual growth rate of the population without considering other more detailed demographic variables., such as the age Age-Sex population structure, particularly the group entering the labor market or expected to enter in the near future. The growth of the economically active population can contribute to increased economic growth [12].

The fourth viewpoint confirms that the relationship between these two variables is one of mutual influence, as there is no clear generalization regarding the impact of population growth on the economic growth of countries that vary in growth rates, densities, and income levels [8].

The fifth viewpoint states that the relationship between population growth and economic growth changes over time. Initially, demographic changes have a positive effect on economic growth; however, the magnitude of this effect diminishes over time and becomes negative by the end of the period. In

other words, the relationship between the variables takes the shape of an inverted U-curve. The authors explain this phenomenon through the three stages of demographic transitions: the first stage is characterized by high fertility with high mortality rates, the second stage features high fertility with declining mortality rates, and the third stage is characterized by low fertility with low mortality rates [7].

So there are five perspectives regarding the relationship between population growth and economic growth, which are: Population growth does not contribute to economic growth, Population growth stimulates economic growth, The population effect is neutral, interrelationship, and The relationship changes over time.

2. Literature Review

As stated in the Introduction, there is no consensus about the effects of population growth on economic growth. Empirical studies have found evidence in favor of negative, positive, and neutral effects as well as of no effects at all.

We find the study by Dodson [12] that examined the impact of population growth on the three pillars of sustainability, focusing on variables that represent the environmental, social, and economic dimensions. The results indicate that population growth in Egypt negatively affects the country's ability to achieve sustainable development, primarily due to its adverse impact on the environment. Although this study did not examine the relationship between population growth and economic growth in Egypt, However, it is important as it is one of studies to highlight the ways population growth directly and indirectly affects all pillars of sustainable development.

The study of Brida, J. G., [7] examined the relationship between population and economic growth in 111 countries from 1960 to 2019, revealing three patterns of the relationship between economic growth and population growth that vary from one group to another. These countries were classified based on this relationship into mature economies, transitional economies, and young economies. while it provides evidence of interdependence between economic growth and population, it does not allow conclusions to be drawn about causal relationships, nor about the sign or magnitude of possible effects.

The study by Awda [14] attempts to monitor the population issue and its various implications, including that population growth hinders the state's efforts in the sustainable development process aimed at improving the lives of Egyptian citizens. It also negatively affects job opportunities, unemployment, poverty, and the lack of an increase in household income. However, the research's reliance on a field study, typically conducted within a specific geographical area (Zagazig University) and over a short period in 2023, limits its results from being generalized on a wider scale or across different time periods.

The study by Suluk, S., [10] aimed to explore the relationship between population growth and economic growth in Singapore from 1970 to 2020. The findings revealed a one-way causal relationship, indicating that the population growth had a positive impact on economic growth in Singapore. While the study spans a long period and provides stable results, it does not address the spatial variations in this relationship.

The study by Güney [15] aimed to analyze the impact of population growth on sustainable development. The study was conducted in 146 countries during the period from 1990 to 2012. It concluded that there is a negative impact of population growth rates on sustainable development in developing countries, while the impact is positive in developed countries. Despite the importance of the study, the findings were general and unclear.

The study by Peterson, E. W. F., [16] relied on historical data to determine the relationship between population growth and economic growth over the past two hundred years. It stated that the relationship between population growth and economic growth has multiple forms, as a decline in population growth in high-income countries may create social and economic problems, while an increase in population growth in low-income countries may slow their growth. But, this study was conducted in the world's major regions and selected no more than 23 countries, most of which are from the developed world, This leads to methodological problems affecting the credibility of the findings.

And the study by Sibe, J. P., [17] evaluated the relationship between population growth and per capita income in 30 of the most populous countries in the world over a period of 53 years. These countries represent 78% of the total global population, regardless of their levels of development. It was found that there is a long-term equilibrium relationship between population growth and economic growth, and that population growth and economic growth are positively linked, and population growth positively influences economic growth in the long term.

Although the topic is important, the selection of these countries was based solely on population size, without considering demographic characteristics that could yield different results.

A study by Zahan, I., [18] confirmed the existence of a long-term relationship between population growth and economic growth in Bangladesh, noting that population growth negatively impacts per capita GDP. In general, an increasing population raises the youth dependency ratio, which leads to a decrease in per capita GDP. Furthermore, the additional labor is

not utilized efficiently. But one of the most significant limitations of this study is the issue of causality present in econometric models, which makes it difficult to clearly establish the direction of the relationship between variables, and some important mediating factors, such as the quality of human capital and education levels, have not been sufficiently considered.

A study by Mohammed, [3] examined the relationship between the demographic growth rate and the economic growth rate in Algeria, The study confirmed that the developmental issues in Algeria have multiple causes, not just population growth, but rather stem from the lack of alignment between the increase in economic growth and the increase in demographic growth. It emphasized that there is no impact of the demographic growth rate on the economic growth rate during the period from 1970 to 2009. This finding is specific to Algeria and cannot be generalized to all countries.

However, the most prominent limitation lies in the difficulty of definitively determining the direction of causality between demographic and economic growth using econometric models. Moreover, the study did not sufficiently incorporate the role of institutional and political factors in shaping this relationship.

A study by Garza-Rodriguez, J., [6] analyzed the relationship between population growth and economic growth for the period 1960-2014. It showed a long-term equilibrium relationship between population and economic growth in Mexico, and found that economic growth has a negative impact on population growth in the long run.The main limitations lie in the difficulty of determining the direction of causality between population and economic growth in standard models, in addition to the focus on the total population rather than human capital.

A study by Niemets, L., [1] was addressed the nature and importance of demographic socio-economic factors development, based on European standards, and calculated demographic potentials of the regions of Ukraine and identified the place of Kharkiv region among them, which has significant demographic potential, a strong potential functions of academic, university and industry science, technical and production potential of many leading companies, including high-tech industries in the industrial complex that allows to produce and to deliver competitive products. It was also outlined the necessity of strategies and programs forming in view of the intraregional features. However, limitations arose from the specific nature of the study, which focuses on the case of the Kharkiv region in Ukraine, thus limiting the possibility of generalizing the results.

A study by Berry, C., [19] indicated that the relationship between population growth and economic growth in the United Kingdom has been variable and not consistent; for instance, the high population growth in the mid to late 1960s was accompanied by high economic growth, while the low population growth in the 1970s corresponded with lower economic growth. Similarly, the high population growth from the mid-1980s onward was matched by relatively high economic growth. Since the early 2000s, the population has continued to grow at a high rate, while the economy experienced a severe recession before beginning to recover in 2013. The main limitations lie in focusing on a single case (the United Kingdom), which reduces the potential for generalization and makes the results conditional on the post-financial crisis context.

The study by Atanda, A. A., [8] reviewed the determinants of population growth among developing countries (Bangladesh, Ethiopia, Indonesia, Mexico, and Nigeria) and developed countries (Germany and the United States). The study highlighted the need for a framework to manage population growth and provide infrastructure for rapidly growing populations in developing countries to enhance their well-being. The main limitations are the difficulty of generalisation due to the enormous variation among the selected developing countries.

A study by Tsen, W. H., [11] observed the relationship between population and economic growth in Asian economies. It showed that there is no long-term relationship between population and economic growth. Overall, the relationship between population and economic growth is not direct. Population growth can be either beneficial or harmful to economic growth, and economic growth may also have an impact on population growth. The main limitations include the diversity among various Asian economies and the fact that the results do not reflect the economic and political developments that have occurred since 2005.

A review of previous studies reveals that they have not addressed the relationship between population growth and economic growth in Egypt from the perspective of population geography. It also did not addresses the relationship at the governorates level, as what the study will attempt to do, which allows for accurate monitoring of spatial variations and provides realistic and applicable insights into formulating geographically targeted development policies.

3. Data and Methodology

The data used in this study's statistical analysis was obtained from the Egypt Demographic and Health Survey 2014 (EDHS), Egypt Family Health Survey 2021(EFHS), The Ministry of Planning, Economic Development, and International Coopera-

tion, and CAPMAS 2017, Every governorate in Egypt is covered under the current study.

Methodology: The study followed the topical approach, the historical approach, in addition to the descriptive method, and the cartographic method represented by the Geographic Information Systems (GIS), as well as the statistical method using Excel and the Statistical Package for the Social Sciences (SPSS).

4. Results and Interpretation

4-1: The rate of economic growth and population growth in Egypt: Many research studies have confirmed that economic growth should be three times the rate of population growth in order to achieve a balance between population growth and economic growth, where the economy is capable of creating the necessary jobs for the new generation [20].

This means that the population growth rate in Egypt, which reached 1.90% during 2013 to 2023, as shown in Table (1), requires an economic growth rate exceeding 5.7% annually for citizens to feel the benefits of development. This is especially significant given that the population increased from 61.4 million people in 1993 to 112.7 million in 2023. However, economic growth has not reached this level and remains insufficient to keep pace with population growth. It is still far from the required percentage to accommodate the population increase, despite the government's significant efforts to achieve economic development that alleviates the burden on citizens. This is in light of the gradual decline in the annual population growth rate in Egypt from the beginning to the end of the period, while the economic growth rate is trending upward gradually.

Table 1

Size and Annual Growth Rate of the Population and Economic Growth Rate in Egypt from 1993 to 2023

Year	Population size	Population grouth rate	Economic Growth Rate
2023	112.7	1.90	3.8
2013	93.4	2.08	3.3
2003	76.0	2.16	3.2
1993	61.4	2.62	2.9

Source:

indicator, Data, Population, total. (2025, April 1). Retrieved from World Bank Group: https://data.albankaldawli.org/indicator/SP.POP.TOTL

Real GDP growth, Annual percent change. (2025, April 1). Retrieved from International Monetary Fund: https://www.imf.org/external/datamapper/NGDP_RPCH@WEO/OEMDC/ADVEC/WEOWORLD

Despite the enormous efforts made by the state and its institutions to control the annual population growth rate, there is still much work ahead for the state to implement further measures to regulate population growth. The reasons for the population increase are numerous, the most important of which are: natural increase (the rise in the number of births and the decline in death rates), an increase in life expectancy, and high fertility rates. This has resulted in a higher proportion of the population being under the age of 15, which expands the base of the population pyramid and consequently raises the dependency ratio, creating a significant burden on families and the state in meeting their needs for education, health, food, and other essential requirements. This situation poses an obstacle to achieving economic growth.

The improvement of medical services has contributed to a decrease in mortality rates. Additionally, early marriage has exacerbated the population problem, along with the migration from rural to urban areas and the influx of migrants and refugees, estimated at around 9 million [21],which has increased pressure on all services. There is also the negative role of social customs, the adverse effects of which are evident in the decline of demographic characteristics such as education, health, and unemployment. Furthermore, there is an unequal distribution of the population across the land area in Egypt, leading to negative phenomena such as high poverty rates, a decrease in arable land, a reduction in water resources, and the spread of informal settlements.

By studying Table (2) and Figure (1), the governorates can be divided into three groups based on the population growth rate:

- Governorates with an annual population growth rate of 2.2% or higher,totaling 8 governorates,)29.6% of the total number of governorates in Egypt) include Ismailia and Matrouh governorates, and most of the Upper Egypt governorates. Matrouh has a growth rate of 4.5% annually, attributed to the high levels of fertility in this governorate (4.38 children per woman in 2021) and the low median number of months since preceding birth

(28.8 months) [22]. Additionally, the natural increase was recorded at 36.2 per thousand in 2021 (41.4 per thousand for births and 5.2 per thousand for deaths) [23]. Following Matrouh, the governorates: Qena, Minya, Asyut, Sohag, Fayoum, Beni Suef, and Ismailia.

Table 2

Population Growth Rate and Economic Growth Rate in Egypt (2023)

Governorate	Population	Economy	Governorate	Population	Economy
Cairo	1.52	6.5	Beni Suef	2.45	3.9
Alexandria	1.24	5.5	Fayoum	2.60	3.8
Port Said	1.08	4.0	Menya	2.82	3.5
Suez	1.54	4.0	Assuit	2.82	3.4
Damietta	1.08	2.9	Souhag	2.80	4.6
Dakahlia	1.72	5.5	Qena	2.99	4.9
Sharkia	2.01	6.0	Aswan	2.11	4.0
Kalyubia	1.71	3.7	Luxor	1.24	4.5
Kafr El-Sheikh	1.87	5.6	Red Sea	2.19	1.8
Gharbia	1.6	3.3	New Valley	1.98	7.8
Menoufia	1.85	4.7	Matroh	4.50	2.7
Behera	2.04	4.4	North Sinai	0.73	3.2
Ismailia	2.41	0.4	South Sinai	1.60	2.4
Giza	2.03	5.6	Total	2.05	3.8

Source:

- Ministry of Planning, Economic Development & International Cooperation, United Nations Population Fund, (2020). *Localization of Sustainable Development Goals in Egypt-Governorates of Egypt, Sustainable Development Goals*, First Edition, Cairo.

- Central Agency for Public Mobilization and Statistics. (2017). *General Population, Housing and Establishments Census 2017*. Cairo: Central Agency for Public Mobilization and Statistics Press.

- Central Agency for Public Mobilization and Statistics (2023). *Annual Statistical Book*, Cairo: Central Agency for Public Mobilization and Statistics Press.

As it has been said, population growth resulting from high fertility rates, as in these provinces, can reduce overall well-being, unlike growth resulting from lower mortality rates, which encourages people to increase savings and improves economic growth (Peterson, E. W. F., 2017, p. 12).

- It was distributed in most governorates (14 governorates, accounting for 51.9% of the total number of governorates in the republic) with a growth rate ranging between 1.5% and less than 2.2% annually. These governorates are: Red Sea, Aswan, Beheira, Giza, Sharqia, New Valley, Kafr El Sheikh, Monufia, Dakahlia, Qalyubia, South Sinai, Gharbia, Suez, and Cairo.

- Five governorates (18.5% of the total number of governorates in the Egypt) achieved an annual growth rate of less than 1.5% per year. These governorates include Luxor, Alexandria, Port Said, Damietta, and North Sinai. This decline in population growth rate in these governorates is attributed to changes in couples' attitudes towards regulating fertility levels and adopting a small family model, which is due to the ease of access to family planning methods and services provided by the state at various outlets [24]. These variations in population growth rates among the governorates reflect changes in the total fertility rate, as well as the population size resulting from natural increase and migration between governorates.

By studying Table (2) and Figure (2), the governorates can be divided based on the economic growth rate in the governorates of Egypt in 2023 into three groups:

- There are nine governorates with a growth rate of 4.7% or higher, which is 33.3% of the total number of Governorates in Egypt. These include Alexandria and the region comprising the governorates of North and East Delta, Cairo, Giza, New Valley, and Qena.
- In the most of governorates (16 governorates,

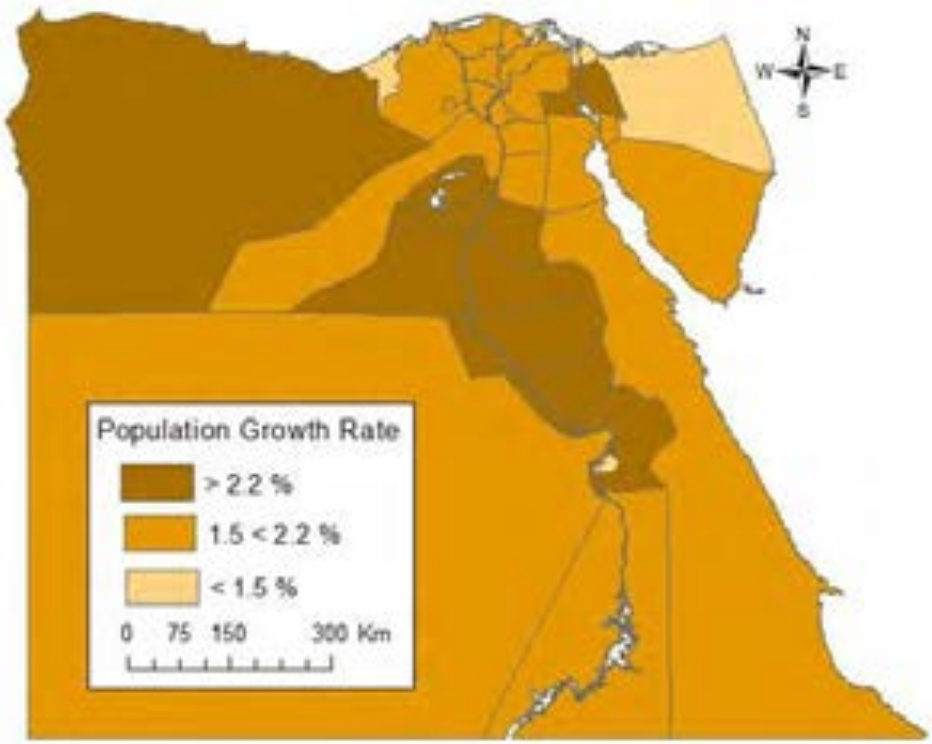


Fig. 1. Population growth rate in the governorates of Egypt (2017 – 2023)

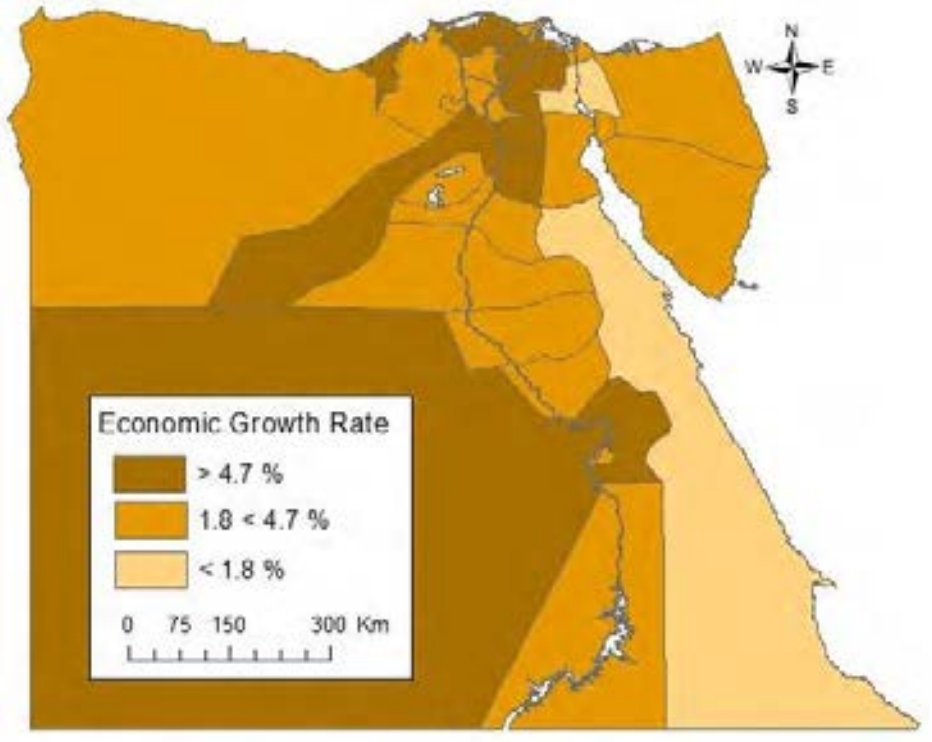


Fig. 2. Economic Growth Rate in Egypt's Governorates 2023

accounting for 59.3% of the total number of governorates in Egypt) the growth rate ranging between 1.8% and less than 4.7%, across several areas; the first in Port Said, and the governorates of Sinai and Suez, as well as in the northern and central Upper Egypt, in addition to Aswan governorate in southern Egypt, and area located in the central and western of the Nile Delta, in addition to Matrouh governorate.

- It represents a growth rate of less than 1.8% and is located in the governorates of Ismailia and Red Sea, accounting for 7.4% of the total number of governorates in Egypt.

The explanation for the decline in the economic growth rate in the second and third categories is largely attributed to the population distribution between rural and urban areas, which is one of the main obstacles to development. The high population

density in a specific area represents a significant pressure on infrastructure services [25].

Additionally, in low-income agricultural communities, population growth is low due to the limited income per capita caused by the low returns on labor, which increases the utilization of resources. This is evident in the rural governorates of Upper Egypt, particularly in Assiut, where the rural population constitutes 72.9%, in Fayoum 76.8%, in Sohag 78.6%, and in Minya 80.9% [26]. In contrast, population growth in high-income urban economies leads to greater income growth as a result of increased returns from greater specialization and growth in investments in human capital [16], especially in urban governorates such as Cairo, which has a 100% urban population, Port Said at the same percentage, and Alexandria at 98% [27].

Figure (3) shows notable observations:

- New Valley stands out with the highest economic growth (7.8%) despite moderate population growth which is required potential investment destination.
- Matrouh has very high population growth (4.5%) but only moderate economic expansion, this indicates potential future service/infrastructure stress.
- Ismailia shows extremely low economic growth (0.4%), indicating urgent development support, although population growth is not extreme.
- The largest metropolitan centers (Cairo, Alexandria, Giza) show strong economic performance with controlled population growth, which supports more sustainable development balance.
- Outliers Values; New Valley (Very high economic rate), Matrouh (Very high population growth), Ismailia (low economic growth). These governorates require special policy attention and tailored regional planning strategies.

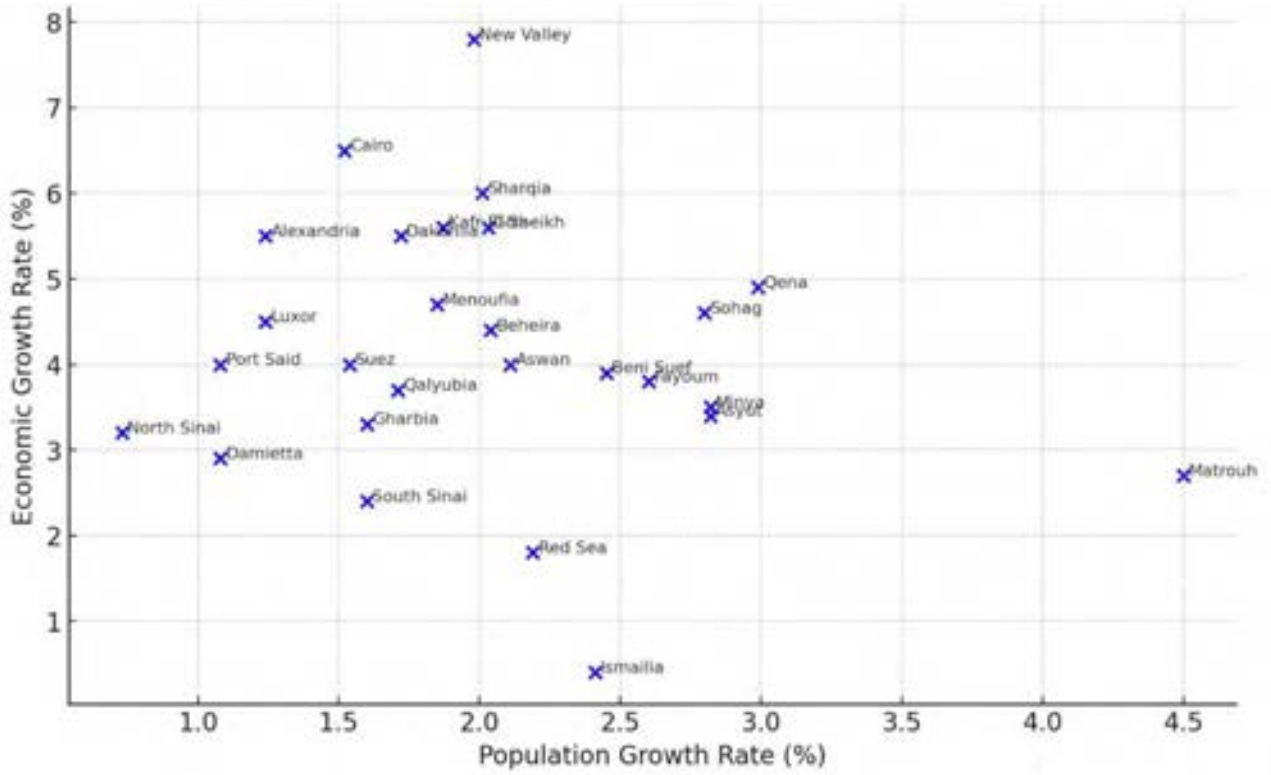


Fig. 3. Population Growth Rate and Economic Growth Rate across Egyptian Governorates

Optimal Population Size: The theory of optimal population size is one of the modern theories that connects the economic resources with the population size. This term is defined as the size at which the value of certain variables reaches their maximum limit, providing a happy life.

The average per capita income equivalent index - income adjusted for price levels[1] - is considered one of the most important methods for determining the optimal population size, as well as a criterion for distinguishing between overpopulation and underpopulation in Egypt.

The population size in Egypt in 1990, which was 57.2 million people, is considered the optimal size for the population of Egypt. The extent to which the population in Egypt deviates from the optimal population size is measured using the Dal-

[1] The equivalent average income was obtained using the equation: Equivalent per capita income = Average per capita national income in dollars ÷ Standard prices of consumer goods.

ton equation[2]., And as per Dalton's equation, the population size has diverged from the optimal size by a positive value of 1.0

4-2: The relationship between population growth rate and economic growth rate: The economic cost of population increase is reflected in the loss of human capital; as family size increases, parents have fewer opportunities to educate their children. At the national level, population growth puts pressure on the state budget, leading to a reduction in essential social services such as housing, health, security, and others. Additionally, there is a decline in household and national savings rates.

The negative impact does not stop there; it generates further negative effects. The decrease in income and decline in the standard of living which push poor families towards having more children as a source of cheap labor and social security for parents in old age. This leads to what is referred to as the "poverty cycle" or "population trap," as Figure 4. This means increased population growth and greater dependency burdens at both the family and national levels, resulting in a decline in human capital, reduced savings and investment, and consequently, a slowdown in economic growth, leading to poverty and high unemployment.

By studying Table 3, which illustrates the inverse correlation coefficient (-0.938*) between population growth rate and economic growth rate in Egypt.

However, when studying the relationship between population growth rates and economic growth rates in Egypt's governorates, it was found that there are several different trends, making it difficult to extract a direct relationship between them. This is due to the presence of other factors that have a greater and more significant impact on the economic growth rate in these governorates, the most important of which are: human resources and their ability for creativity, training, and learning; natural resources, whether above or below the ground, meaning the land with its geographical characteristics and the resources it contains; productive capital directly from facilities, buildings, and equipment; indirect capital represented by infrastructure; technological development; in addition to social factors represented by customs, traditions, and others. These various relationships are as follows:

First: Low population growth rate and low economic growth rate: This relationship is represented by the governorates of Damietta, Suez, Gharbia, South Sinai, Qalyubia, and Menoufia, (22.2% of the total number of governorates and 17.7% of the total population in Egypt, 2023).

Second: Low population growth rate and high economic growth rate: This pattern is known for benefiting from the "demographic dividend." where this relationship is seen in the governorates of North Sinai, Port Said, Alexandria, Luxor, Cairo, and Dakahlia, (22.2% of the total number of governorates and 24.2% of the total population in Egypt, 2023).

Third: High population growth rate and high economic growth rate: This relationship is represented by the governorates of Kafr El Sheikh, New Valley, and Sharqia, (11.1% of the total number of governorates and 11.3% of the total population in Egypt, 2023).

Fourth: High population growth rate and low economic growth rate: This is often associated with closed economies, commonly referred to as the "poverty trap" [7], as seen in the governorates of Giza, Beheira, Aswan, Red Sea, Ismailia, Beni Suef, Fayoum, Sohag, Assiut, Minya, Qena, and Matrouh, (44.5% of the total number of governorates and 46.8% of the total population in Egypt, 2023).

4-3: Egypt governorates according to the relationship between population growth rate and economic growth rate: By conducting a cumulative ranking of this relationship and converting it into a map for monitoring and planning priorities, as shown in Table 4 and Figure 5. These governorates can be classified into:

First: Low-risk governorates, which include:

A. *Leading Governorates:*This category is distributed across seven governorates; 25.9% of the total governorates in Egypt, inhabited by 26.2 million people, which represents 24.5% of the total population of Egypt in 2023. They are distributed across the governorates of New Valley, Luxor, Cairo, North Sinai, Port Said, Dakahlia, and Alexandria.

B. *Balanced Governorates*: This category was found in only two governorates in the Delta; Sharqia and Kafr El-Sheikh, (7.4% of the total governorates in Egypt). They are inhabited by 11.8 million people,(11% of the total population in Egypt in 2023).

These two categories (A & B) exhibit strong economic dynamics while maintaining controlled population pressure and achieving a more sustainable development balance.

Second: Moderate-risk governorates: This category is spread across 13 governorates (48.2% of

[2] Dalton's Equation: M = (A - O) ÷ O
M = The deviation of the population size from the optimal size.
A = The current population size.
O = The optimal size.
If the result equals zero, the population has reached the optimal size.
If the result is positive, it indicates population explosion or overcrowding, while a negative result indicates a state of population deficiency.

the total governorates in Egypt, with a population of 52.2 million, 48.7% of the total population in Egypt in 2023). It has appeared in two main regions: the first in northern Egypt, which includes the governorates of Ismailia, South Sinai, Suez, Giza, Beni Suef, Qalyubia, Menoufia, Gharbia, Beheira, in addition to Damietta. The second region is in Upper Egypt in Sohag, Qena, and Aswan, this category may require economic stimulation policies.

Third: High-Risk Governorates: This category is present in five governorates, 18.5% of all governorates in Egypt, with a population of 16.9 million, 15.8% of the total population of Egypt in 2023. They are distributed across Upper Egypt, including

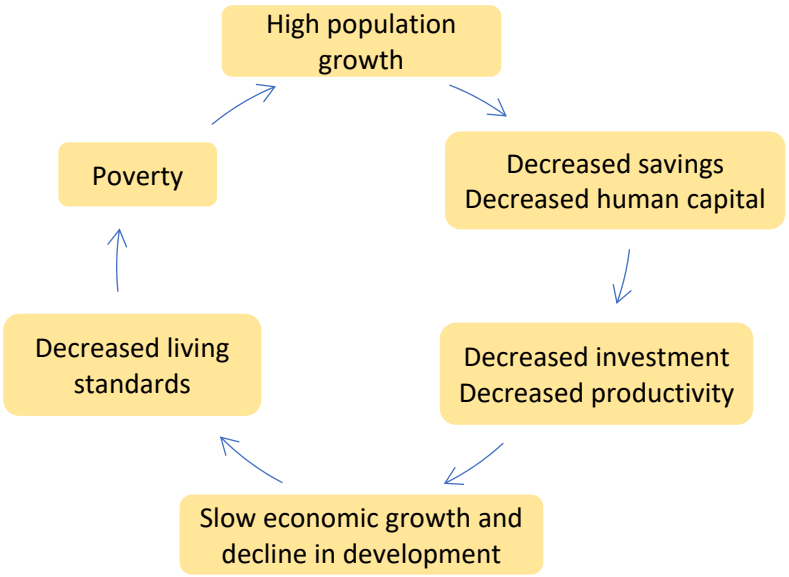


Fig. 4. Circle or cycle of poverty - population trap

Source: Saleh, Lorance Yahi (2012) The Economic Costs of Population Explosion in Developing Countries – China as a Case Study, *Baghdad College of Economic Sciences University,* Issue 31, Baghdad, Pages: 83-114, p. 94

Table 3

Correlation coefficients between population growth rate and economic growth rate in Egypt

Correlations

		one	tow
one	Pearson Correlation	1	-.938*
	Sig. (2-tailed)		.018
	N	5	5
tow	Pearson Correlation	-.938*	1
	Sig. (2-tailed)	.018	
	N	5	5

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Source: Statistical Package for the Social Sciences (SPSS)

Table 4

Cumulative Ranking of the Relationship Between Population Growth Rate and Economic Growth Rate in Egyptian Governorates

Classification		Governorates
Low risk	Leading Governorates	New Valley – Luxor – Cairo - North Sinai - Port Said – Dakahlia – Alexandria.
	Balanced	Sharqia - Kafr El-Sheikh.
Moderate risk		Suez - Damietta - Qalyubia - Gharbia - Menoufia - Beheira - Ismailia - Giza - Beni Suef - Sohag - Qena - Aswan - South Sinai.
High risk		Fayoum - Minya - Assiut - Red Sea - Marsa Matrou

Source: Based on the outputs of cluster analysis in SPSS

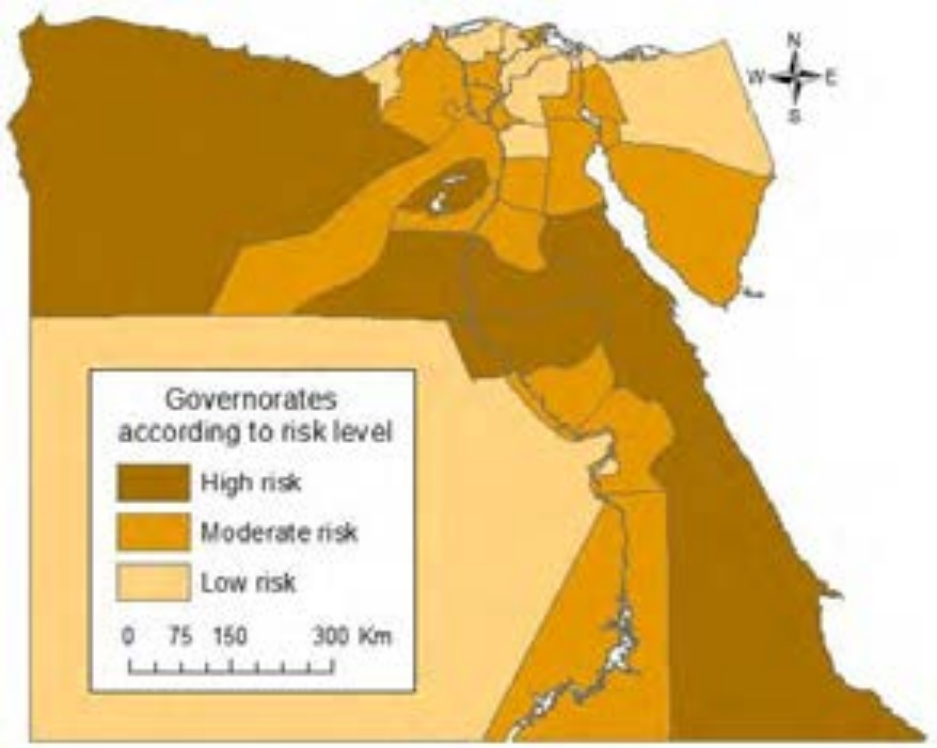


Fig. 5. The governorates of Egypt according to the relationship between the population growth rate and the economic growth rate in 2023

the governorates of Red Sea, Minya, Assiut, in addition to Fayoum and Matrouh in the northwest of Egypt ,in this category Population is growing faster than the economy, Which leads to higher pressure on services, jobs, and infrastructure.

The analysis of the previous figure clearly indicates that the Upper Egypt governorates are the most in need of care, with varying degrees of severity, starting from the worst situation in the governorates: Matrouh, Assiut, Minya, Sohag, and Faiyum.

Furthermore, the results reveal significant spatial variations among the governorates of Egypt, highlighting the differences in economic and social conditions.

Conclusion and Recommendations:

A. Conclusion:

- There are five perspectives regarding the relationship between population growth and economic growth, which are: Population growth does not contribute to economic growth, Population growth stimulates economic growth, The population effect is neutral, interrelationship, and The relationship changes over time.
- The study confirmed that population growth in Egypt has a significant impact on economic growth.
- The current population growth rate in Egypt is 1.90%, which requires an economic growth rate exceeding 5.7% annually for citizens to reap the benefits of development; however, the economic growth has not reached this level.
- Population growth resulting from high fertility rates can reduce well-being, as seen in the governorates of Matrouh, Qena, Minya, Assiut, Sohag, Faiyum, and Beni Suef.
- The maldistribution of population in rural and urban areas has led to a decline in the economic growth rate. The governorates with a rural character, particularly Assiut, Fayoum, Sohag, and Minya, have experienced a low economic growth rate, in contrast to urban economies, especially in Cairo, Port Said, and Alexandria.
- The population size in Egypt in 1990, which was 57.2 million, is considered the optimal size for Egypt's population, and it has been shown that Egypt's deviation from the optimal size reached +1.0.
- There is a strong inverse correlation (-0.938*) between the population growth rate and the economic growth rate.
- The study clarified that there are several trends in the relationship between population growth rates and economic growth rates across Egypt's governorates. These trends are categorized as follows:
  - Low population growth rate and low economic growth rate.
  - Low population growth rate and high economic growth rate.
  - High population growth rate and high economic growth rate.
  - High population growth rate and low economic growth rate.

- The study indicated that there are 18 governorates, 66.7% of the total governorates in Egypt, inhabited by 69.1 million people, which represents 64.5% of the total population in Egypt in 2023. These areas face moderate to high risks, based on the relationship between population growth rates and economic growth rates.
- The study revealed that the Upper Egypt governorates are the most in need of care, with varying percentages, starting from the worst conditions in the governorates of Matrouh, Assiut, Minya, Sohag, and Fayoum.

B. Recommendations:

The study has revealed a strong and significant correlation between the population growth rate and its influence on economic growth rate. This underscores the urgent need to adopt a comprehensive strategy built upon three essential pillars:

First: Population pillar:

- Supporting the National Population and Development Strategy in Egypt (2023 - 2030), which adopts on four key pillars: population growth and reproductive health, human capital development, regional development and balanced urbanisation, and social justice and inclusive development. This will be achieved by updating the institutional framework to implement the strategy, allocating necessary budgets for execution, and establishing a monitoring and evaluation mechanism in each governorate.
- Controlling the population growth rate through regulating population growth and enhancing demographic characteristics, to improve economic performance, by advancing family planning and reproductive health services, spreading reproductive health services for birth spacing, reducing the birth rate, and empowering women in a way that positively impacts women's reproductive health. This includes increasing awareness programs and improving religious discourse regarding family planning and reproductive health to disseminate the benefits and importance of family planning through awareness seminars and all available means, in coordination with the executive authorities in the governorates.
- Linking cash assistance to family planning compliance, activating literacy programs, and preventing child labour, in addition to reviewing the roles of the National Population Council, the National Council for Women, and the National Council for Childhood and Motherhood regarding population and development issues. Efforts should be made to change the prevailing customs, traditions, and culture in society concerning the concept of large families as a source of strength, wealth, and security, particularly in the governorates of: Marsa Matrouh, Qena, Minya, Assiut, Sohag, Fayoum, Beni Suef, Ismailia, Red Sea, Aswan, Beheira, Giza, Sharqia, New Valley, and Kafr El Sheikh, 55.6% of the total number of governorates and 58.1% of the total population in Egypt in 2023.

Second: Increasing the economic growth rate:

The economic performance of the governorates improves with better indicators in education, employment, and empowerment, especially in the governorates that are prioritized for care, which suffer from a high population growth rate and a low economic growth rate. These Governorate include: Red Sea, Marsa Matrouh , Assiut, Minya , and Fayoum.

Third: The integration of the economic dimension and the demographic dimension through:

- Increasing investments in the governorates that have a surplus of human capital to achieve a balance between population growth and economic growth, such as the governorates of Giza, Beheira, Aswan, Red Sea, Ismailia, Beni Suef, Faiyum, Sohag, Assiut, Minya, Qena, and Matrouh, 44.5% of the total number of governorates and 46.8% of the total population in Egypt in 2023.
- Increasing investments to develop human capital through capacity-building programs and transformative training to achieve a greater return on existing investments in provinces where the economic growth rate exceeds the population growth rate, such as the governorates of North Sinai, Port Said, Alexandria, Luxor, Cairo, and Dakahlia, 22.2% of the total number of provinces and 24.2% of the total population in Egypt in 2023.

References

1. *Niemets, L., Segida, K., & Guseva, N. (2015). Demographic potential as the basis for social and economic development. Economic Annals-XXI, (3-4) (1), 93-96. https://ea21journal.world/index.php/ea-v149-22/*
2. *Groth, H., & Sousa-Poza, A. (Eds.). (2012). Population dynamics in muslim countries: Assembling the jigsaw. Springer Science & Business Media.*
3. *Mohamed, Owais. (2016). Demographic Growth and Its Relationship with Economic Growth in Algeria, Journal of Social and Human Sciences, 10, Mohamed Boudiaf University of M'sila, Algeria: 99-120.*
4. *Mahmoud, Duaa (2023). Factors Influencing the Growth of the Egyptian Economy, Journal of the Advances in Agricultural Researches, 28 (1), Faculty of Agriculture, Alexandria University: 15-23.*

5. *Othman, Majid & Georges, Hanan. (2021). The relationship between human investment in the governorates and their economic performance, analysis of the economic census data 2017/2018, Macroeconomic Reform and Stability Project, United States Agency for International Development (USAID), DAI Global, LLC, Ministry of Planning and Economic Development, Egyptian Center for Public Opinion Research (Baseera), Cairo, Egypt.*
6. *Garza-Rodriguez, J., Andrade-Velasco, C. I., Martinez-Silva, K. D., Renteria-Rodriguez, F. D., & Vallejo-Castillo, P. A. (2016). The relationship between population growth and economic growth in Mexico. Economics Bulletin, 36(1), 97–107.*
7. *Brida, J. G., Alvarez, E., Cayssials, G., & Mednik, M. (2024). How does population growth affect economic growth and vice versa? An empirical analysis. Review of Economics and Political Science, 9 (3), 265–297. https://doi.org/10.1108/REPS-11-2022-0093*
8. *Atanda, Akinwande A. and Aminu, Salaudeen B. and Alimi, Olorunfemi Y. (2012): The role of population on economic growth and development: evidence from developing countries. URI: https://mpra.ub.uni-muenchen.de/id/eprint/37966*
9. *Mostafa, Iman Mohamed Abdel Latif (2020) The Impact of Rapid Population Growth on Sustainable Development in Egypt during the Period (1977 - 2018), Arab Journal of Administration, 40 (2), Arab Organization for Administrative Development, League of Arab States, Cairo: 141-160.*
10. *Suluk, S. (2021). The relationship between population growth and economic growth: The case of Singapore. International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences, 11(12), 2385–2400. https://doi.org/10.6007/IJARBSS/v11-i12/11702*
11. *Tsen, W. H., & Furuoka, F. (2005). The relationship between population and economic growth in Asian economies. ASEAN Economic Bulletin, 314-330. https://doi.org/10.1355/ae22-3e*
12. *Al-Mahjoubi, Khaled Ali Al-Ajili (2017). "Population and Demographic Changes and Their Impact on Macroeconomic Variables in the Libyan Economy: An Analytical Study." Journal of Finance and Markets, 4 (1), Laboratory of Macroeconomic Dynamics and Structural Changes, Dynamics, Abdelhamid Ben Badis University, Mostaganem, Algeria: 88-112.*
13. *Dodson, J. (2025, February 19). Including population growth in sustainability discussions, case study: Egypt. Retrieved from The Overpopulation Project: https://overpopulation-project.com/including-population-growth-in-sustainability-discussions-case-study-egypt/*
14. *Awda, Samar Ibrahim. (2023). The risks of population growth on sustainable development in the New Republic – Egypt: "Field research at Zagazig University as a social organization and its role in addressing population growth," Journal of the Faculty of Arts, Port Said University, 24, Part 2: 1–62.*
15. *Güney, T. (2017). Population growth and sustainable development in developed-developing countries: An IV (2SLS) approach. Population, 22(4), 1255–1277.*
16. *Peterson, E. W. F. (2017). The role of population in economic growth. Sage Open, 7(4), https://doi.org/10.1177/2158244017736094*
17. *Sibe, J. P., Chiatchoua, C., & Megne, M. N. (2016). The Long Run Relationship between Population Growth and Economic Growth: A Panel Data Analysis of 30 of the Most Populated Countries of the World. Análisis Económico, 31(77), 205-218. https://www.redalyc.org/pdf/413/41345703009.pdf*
18. *Zahan, I. (2016). The long run relationship between population growth and economic growth: Empirical evidence from Bangladesh. https://bigd.bracu.ac.bd/wp-content/uploads/2020/07/The-Long-Run-Relationship-between-population-growth-and-economic-growth.pdf*
19. *Berry, C. (2014). The relationship between economic growth and population growth. SPERI British Political Economy Brief, 7. https://sheffield.ac.uk/speri/research/publications*
20. *Heba Zain. (March 21, 2025). A Statistical Reading of the Characteristics of the Egyptian Family and Population Growth. Retrieved from the Egyptian Observatory, Egyptian Center for Thought and Strategic Studies: https://marsad.ecss.com.eg/71677*
21. *Refugee Context in Egypt. (2025, March 26). Retrieved from UNHCR The UN Refugee Agency. Egypt: https://www.unhcr.org/eg/about-us/refugee-context-in-egypt.*
22. *CAPMAS. & EL-Zanaty, F. (2022). Egypt family health survey 2021. Cairo: Central Agency for Public Mobilization and Statistics. https://censusinfo.capmas.gov.eg/metadata-en-v4.2/index.php/catalog/665*
23. *Central Agency for Public Mobilization and Statistics (2023). Annual Statistical Book, Cairo: Central Agency for Public Mobilization and Statistics Press. https://www.capmas.gov.eg/publications/166*
24. *Makhloof, Hisham. (2003) The Population of Egypt in the Future and the Implications of Population Growth (2002-2021), Papers in Egyptian Demography, (6), Cairo Demographic Center (CDC), Cairo, Egypt.*
25. *National Population Council (2023) National Strategy for Population and Development 2023 - 2030, (Publications of the National Population Council, Ministry of Health and Population), Cairo, Egypt.*
26. *National Population Council (2022). The Role of the State in Population Displacement, Opportunities and Challenges, (Publications of the National Population Council), Cairo, Egypt.*
27. *National Population Council (2022) Report on the Ranking of Demographic Indicators for Governorates and Regions 2022, (Publications of the National Population Council, Ministry of Health and Population), Cairo, Egypt.*

Зв'язок між зростанням населення та економічним зростанням в Єгипті: географічна перспектива

Ахмед Фуад Ельмугазі
доцент кафедри географії населення,
Афро-Азійський інститут,
Університет Суецького каналу, Ісмаїлія, Єгипет

В Єгипті кореляція між зростанням населення та економічним зростанням є дуже значущою; перший показник відображає збільшення чисельності населення, тоді як інший показник відображає економічний аспект, а також зростаючу стурбованість щодо небезпеки зростання населення для економічного зростання в Єгипті. Дослідження має на меті дослідити кореляцію між зростанням населення та економічним зростанням в Єгипті з 1993 по 2023 рік, з особливим акцентом на різні губернаторства у 2023 році; Визначення впливу зростання населення на економічне зростання в Єгипті протягом періоду 1993-2023 років, а також як змінилися темпи економічного зростання та приросту населення в Єгипті, оптимальний розмір населення для Єгипту та межі взаємозв'язку між річними темпами приросту населення та темпами економічного зростання. Дані, використані в статистичному аналізі цього дослідження, були отримані з Єгипетського демографічного та медичного обстеження 2014 року (EDHS), Єгипетського сімейного обстеження здоров'я 2021 року (EFHS), Міністерства планування, економічного розвитку та міжнародного співробітництва, а також CAPMAS 2017. Кожне губернаторство Єгипту охоплено цим дослідженням. Дослідження показало, що поточний темп приросту населення в Єгипті становить 1,90%, що вимагає темпів економічного зростання, що перевищують 5,7% щорічно, щоб громадяни могли скористатися перевагами розвитку; однак економічне зростання ще не досягло цього рівня. Дослідження показало, що існує сильна обернена кореляція (-0,938*) між темпами зростання населення та темпами економічного зростання, найбільше потребують уваги губернаторства Верхнього Єгипту. Рекомендовано провадити роботи над трьома напрямками. Перший – це населення, шляхом підтримки національної стратегії щодо народонаселення та розвитку Єгипту (2023–2030) та контролю темпів зростання населення. Другий – робота над збільшенням темпів економічного зростання, особливо в малозабезпечених губернаторах, які страждають від високих темпів зростання населення та низьких темпів економічного зростання, таких як губернаторство Червоне море, губернаторство Мерса-Матрух, губернаторство Асьют, губернаторство Мінья та губернаторство Файюм. Третій – робота над інтеграцією економічного та демографічного аспектів.

Ключові слова*: губернаторства Єгипту, зростання населення, економічне зростання, економічний розвиток, оптимальний розмір населення, популяційна пастка, коефіцієнт кореляції, рівняння Дальтона, губернаторства високого ризику.*

Надійшла 13 червня 2025 р.
Прийнята 17 листопада 2025 р.

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-16
УДК 551.577.32(477):551.501.777
Надійшла 6 серпня 2025 р.
Прийнята 28 вересня 2025 р.

Сучасні тенденції зміни річного ходу атмосферних опадів в Україні

Василь Затула
к. геогр. н., доцент, кафедра метеорології та кліматології,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна,
e-mail: vaszatula@knu.ua, https://orcid.org/0000-0001-5598-0200

В кліматичних описах територій важлива роль відводиться режиму атмосферних опадів, їх кількості та розподілу протягом року. Винятково велике значення ці відомості набувають при плануванні та управлінні водними ресурсами. Основна мета даного дослідження полягала у представленні розширеної характеристики річного ходу атмосферних опадів на території України та встановленні найважливіших особливостей його зміни за період 1961-2020 рр. Інформаційну базу дослідження становлять дані спостережень за місячною і річною кількістю атмосферних опадів на 153 метеорологічних станціях континентальної частини України за періоди 1961-1990 і 1991-2020 рр. Найважливіші характеристики режиму зволоження обчислювалися із застосуванням як стандартних методів статичного аналізу, так і методу гармонічного аналізу. Основний акцент роботи зроблено на параметрах гармонічного аналізу вихідних рядів спостереження в 1961-1990 та 1991-2020 роках та утворених на їх основі різницевих рядів зі змінами кількості опадів, насамперед амплітуді C_1 і фазі t_1 річної гармоніки, а також її внеску f_1 в загальну дисперсію місячних рядів опадів. Було виявлено великі просторові неоднорідності в розподілі річних і місячних сум опадів. Гармонічний аналіз дозволив встановити й важливі закономірності всередині річного ходу сум опадів. Основну роль в сезонних коливаннях місячних сум опадів відіграє річна, рідше – піврічна гармоніка. При переході від першого періоду спостереження (1961-1990 рр.) до другого (1991-2020 рр.) відчутно послабилася тіснота оберненого зв'язку між частинами дисперсії, зумовленими цими гармоніками (коефіцієнт детермінації R^2 між параметрами f_1 та f_2 річної і піврічної гармонік зменшився з 0,876 до 0,661). Водночас відчутно зменшився нахил прямих залежності між цими параметрами (коефіцієнт рівняння лінійної регресії змінився від -0,771 до -0,47). Встановлено, що амплітуда і фазова структура річної гармоніки, а також відносна роль річної і піврічної гармонік місячної кількості опадів в умовах сучасного клімату зазнали значних змін. Імовірно, це зумовлено змінами в характері циркуляції атмосфери над усім Атлантико-Європейським сектором, хоча вплив місцевих чинників кліматоутворення виключати повністю також не можна. Виявлені зміни фазової структури та інших характеристик річної гармоніки місячних рядів сум опадів сприяють кращому розумінню сучасних тенденцій еволюції стану регіональної кліматичної системи в Україні та будуть корисними при довгостроковому прогнозуванні змін клімату.

***Ключові слова**: річний хід, гармоніки, амплітуда, фаза, регресійний аналіз, повторюваність, суми опадів, зміни клімату, Україна.*

Як цитувати: Затула Василь (2025). Сучасні тенденції зміни річного ходу атмосферних опадів в Україні. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*, (63), 211-220. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-16
In cites: Zatula Vasyl (2025). Present tendencies of annual cycle rainfall change in Ukraine. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 211-220. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-16 [in Ukrainian]

1. Вступ

Постановка проблеми. Атмосферні опади є однією з найважливіших характеристик клімату. З точки зору планування та управління відновними природними ресурсами, насамперед водними, важливою є не тільки річна кількість атмосферних опадів, але і розподіл їх протягом року. Особливості річного ходу атмосферних опадів розглядалися багатьма дослідниками в усьому світі. Однак при цьому характеристики режиму опадів часто складалися тільки на основі традиційних методів аналізу даних стандартних таблиць або карт місячної і річної кількості опадів, тоді як практика вимагає глибшого опрацювання цих матеріалів з використанням спеціальних методів і кліматичних показників.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значний інтерес становлять відомості про час настання максимумів та мінімумів річного ходу атмосферних опадів. Найзагальнішу інформацію такого роду можна почерпнути з класичних робіт класифікації клімату Землі, неодноразово цитованих не менш авторитетними вченими, наприклад в монографії [8]. Деякі з цих класифікацій виявилися настільки успішними, що час від часу використовуються для оцінки тенденцій глобальних змін клімату або навіть проєкцій клімату на майбутнє. В країнах колишнього СРСР в середній і вищій школі найбільш поширеною є класифікація Б.П. Алісова (1891-1972) [1, 23], однак у світі найбільшу популярність здобула класифікація кліматів В.П. Кеппена (1846-1940) та її модифікації [7, 11, 13, 18, 20, 24]. Цікаве узагальнення сучасних зрушень в географії кліматичних зон за Кеппеном-Гейгером в Південно-Східній Європі представлено в [19]. Однак подібні публікації зазвичай не вирізняються деталізацією характеристик режиму опадів.

На регіональному рівні більш ґрунтовно дану проблему розглянуто в роботі [9], де представлено карту розподілу періоду настання макси-

© Затула Василь, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

мальних кількостей опадів в Південній Європі протягом 1961-1990 рр. Аналіз цієї карти говорить про розмитість часу настання максимуму атмосферних опадів на території району дослідження. У всіх частинах району дослідження він не обмежується якимось одним місяцем, а охоплює інтервал двох-трьох місяців, а в чотирьох із них явно виділено навіть окремий тип режиму з нечітким максимумом опадів.

Як видно з представленої у цій роботі карти, у Середній та Східній Європі максимальна кількість опадів припадає на літні місяці, з червня по серпень. В багатьох дослідженнях підкреслюються відносна однорідність режиму опадів в Європі. Зокрема, мала мінливість опадів традиційно пояснюється приналежністю цієї території до зони позатропічних циклонічних опадів [8].

В роботі [3] докладно проаналізовано кліматологічні зміни в настанні найсухішого місяця року в Україні за останні 60 років, а також показано їх значення для формування національної кліматологічної політики та зіставності оцінок аридності клімату в країнах помірного та субтропічного поясів.

Ґрунтовний аналіз найважливіших зрушень в настанні екстремальних опадів в останні десятиріччя представлено в роботі [14].

Коливання кількості атмосферних опадів протягом року з одним максимумом і одним мінімумом можна представити у вигляді простої гармонічної хвилі. За допомогою методу гармонічного аналізу можна оцінити параметри цієї гармоніки та її внесок у сумарну дисперсію річного ходу метеорологічної величини.

Як відомо, в основі методу гармонічного аналізу лежить уявлення про те, що будь-яке значення випадкової величини можна подати у вигляді середнього арифметичного та скінченної суми доданків (гармонік) [25]. У випадку місячних рядів кількості атмосферних опадів, представлених в усіх кліматологічних довідниках, маємо:

$$p_t = \bar{p} + \sum_{i=1}^{n/2}\left[A_i \sin\left(\frac{2\pi}{P} it\right) + B_i \cos\left(\frac{2\pi}{P} it\right)\right], \quad (1)$$

де p_t – кількість атмосферних опадів за t-й місяць ($t = 1, 2, \ldots, 12$); $\bar{p}$ – середнє річне значення цієї величини; $P = 12$ міс. – повний період річного коливання величини; i – порядковий номер гармоніки; $n = 12$ – довжина вихідного ряду (у загальному випадку, наприклад, коли в таблицях даються значення величини тільки для центральних місяців календарних сезонів, величини P і n можуть відрізнятися).

Значення невідомих коефіцієнтів A_i і B_i обчислюються за формулами:

$$A_i = \frac{2}{n}\sum_{t=1}^{n}\left[p_t \sin\left(\frac{2\pi}{P} it\right)\right], \quad (2)$$

$$B_i = \frac{2}{n}\sum_{t=1}^{n}\left[p_t \cos\left(\frac{2\pi}{P} it\right)\right]. \quad (3)$$

Важливо також, що для останньої ($i = n/2$) гармоніки $A_i = 0$, а коефіцієнт B_i потрібно додатково поділити на два.

В гармонічному аналізі вагоме місце відводиться поняттю амплітуди гармоніки, яка виражається через ці коефіцієнти:

$$C_i = \sqrt{A_i^2 + B_i^2}. \quad (4)$$

Періодичні коливання метеорологічної величини, зумовлені кожною окремою гармонікою, зручно подати у вигляді добутку

$$C_i \cos\left[\frac{2\pi}{P}(t - t_i)\right], \quad (5)$$

де

$$t_i = \frac{P}{2\pi i}\operatorname{arctg}(A_i/B_i) – \quad (6)$$

фаза i-тої гармоніки, тобто час досягнення нею максимального значення (міс.). За необхідності значення фази за межами основного інтервалу визначення t_i можна скоректувати.

Потрібно зазначити також, що дисперсія за рахунок будь-якої одиничної гармоніки дорівнює $C_i^2/2$, за винятком останньої гармоніки, для якої вона удвічі більша. Внесок окремої гармоніки в сумарну дисперсію метеорологічної величини визначається за формулою

$$f_i = \frac{C_i^2}{2\sigma^2} \cdot 100, \quad (7)$$

де σ^2 – загальна дисперсія ряду. Для останньої гармоніки величина f_i домножується на два.

Згідно з оцінками [26], в Українських Карпатах середня величина внеску річної гармоніки в сезонні коливання кількості атмосферних опадів перевищує 67,6 %. Піврічна гармоніка відповідала ще за 27,5 % сумарної дисперсії річного ходу. Також було показано, що річний максимум (точніше, фаза річної гармоніки) атмосферних опадів на південно-західному макросхилі цієї гірської системи настає на 0,5-1,0 місяця пізніше, ніж на прилеглих районах Східно-Європейської рівнини. Водночас, в інших регіонах України [2, 4-5] такі оцінки можуть значно відрізнятися від представлених вище.

Як було зазначено в монографії [8], сезонні коливання атмосферних опадів не такі чіткі, як сезонні коливання температури, оскільки вони визначаються впливом великої кількості чинників, дія яких до того ж не завжди є постійною.

Кількість атмосферних опадів, як відомо, визначається режимом циркуляції атмосфери й океану. Можливі зміни атмосферної циркуляції в

помірних широтах Північної півкулі докладно розглядаються в роботі [12]. Відмітимо також певний прогрес в регіональних дослідженнях циркуляційного режиму. Так, в роботі [21] розглянуто можливі зміни режиму циркуляції атмосфери над Північною Атлантикою та Європою під впливом зростання вмісту парникових газів з потенційним послабленням Атлантичної меридіональної циркуляції.

За середніми мультимодельними оцінками, представленими в [24], річні суми опадів в Європі до кінця XXI ст. помітно зростуть. Залежно від рівня радіаційного форсингу, зумовленого антропогенними викидами парникових газів, тут очікується їх збільшення від 1,6 % (SSP1-2.6) до 5,4 % (SSP5-8.5).

Важливі зміни кліматичного режиму, пов'язані з виникненням, проходженням та заповненням позатропічних циклонів в Північній Атлантиці протягом 1950-2021 рр., проаналізовано в роботі [16]. Зокрема, автори вказали на тенденцію до зменшення інтенсивності опадів при них.

В роботі [17] показано, що в Західній Україні на межі XX-XXI ст. відбулося помітне збільшення числа днів з антициклональними типами циркуляції атмосфери.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Попри значну кількість наукових публікацій, присвячених режиму атмосферних опадів в Україні і світі, робіт з докладним аналізом особливостей їх річного ходу небагато. Недостатньо дослідженою в нашій країні є проблема зміни режиму атмосферних опадів в контексті сучасних змін клімату.

Основною **метою даного дослідження** є представлення розгорнутої характеристики річного ходу атмосферних опадів на території України з використанням методу гармонічного аналізу і традиційних підходів кліматологічного аналізу, а також встановлення найважливіших їх змін в проміжку часу від 1961-1990 до 1991-2020 років.

Для досягнення цієї мети було поставлено такі **завдання**:

1) оцінити масштаби відмінностей в режимі атмосферних опадів на території України протягом 30-річних періодів 1961-1990 та 1991-2020 років;
2) описати структурні особливості сезонного режиму атмосферних опадів в Україні в останні два 30-річні періоди, та встановити риси подібності та відмінності між ними;
3) порівняти особливості річного ходу опадів в ці періоди та оцінити масштаби зрушень в часі настання їх максимумів і мінімумів, у т. ч. шляхом аналізу фазової структури річної гармоніки.

2. Матеріали та методи дослідження

Представлені нижче матеріали є результатом аналізу характеристик річного ходу атмосферних опадів на 153 метеорологічних станціях України за останні шістдесят років, які рідко використовують в науковій літературі. Емпіричною основою для їх обчислення послужили дані Кліматичних кадастрів України за періоди 1961-1990 і 1991-2020 рр. Точки спостереження відбиралися серед метеорологічних станцій з повними кліматологічними рядами місячної і річної кількості опадів в обох періодах спостереження. Вони достатньо рівномірно покривають материкову частину території України і належним чином репрезентують усі її природно-кліматичні зони.

3. Результати та обговорення

Спочатку декілька слів щодо стійкості річної кількості атмосферних опадів. Коефіцієнт кореляції між рядами її значень для різних метеорологічних станцій в 1961-1990 і 1991-2020 рр. становив 0,979, що мало б говорити про тісний зв'язок між відповідними рядами величини та синхронний характер зміни рівня зволоженості опадами усієї території України. В середньому по усій вибірці станцій відбулося несуттєве зменшення річної кількості опадів (-2,2 мм), однак у даному випадку значно інформативнішим є велике значення середнього квадратичного відхилення (36,2 мм). Особливо вражає діапазон зміни річної кількості опадів, причому навіть на близько розташованих станціях. Так, річна кількість опадів від першого до другого періоду спостереження зменшилася на 199 мм на станції Плай (Закарпатська обл.) та збільшилася на 126 мм на станції Пожежевська (Івано-Франківська обл.). Загальне враження про неймовірність поєднання настільки різних змін статистичних характеристик досліджуваної метеорологічної величини в останньому випадку нівелюється добре відомим фактом підвищеної мінливості опадів в межах будь-якої гірської країни, Українських Карпат зокрема.

Найбільші абсолютні зміни річної кількості опадів за межами гірських територій також відбулися у найбільш зволоженій частині країни – в Західній Україні: -101 мм у Бережанах Тернопільської області та +76 мм у Рава-Руській Львівської області. Як бачимо, діапазон зміни річної кількості опадів в межах Східно-Європейської рівнини не набагато поступається змінам цієї величини в сусідній гірській країні. При цьому достатньо помітні зміни характеру найближчого оточення відбулися тільки на станції Пожежевська, де середній ступінь закритості горизонту у цей час зріс із 4,4° до 8,6°. Тому залишається припустити, що спостережувані

порушення режиму зволоження є виявами високої природної мінливості атмосферних опадів на території України, або ж вони відбулися під впливом зміни якихось інших чинників.

Розглянемо тепер результати застосування гармонічного аналізу до рядів кількості атмосферних опадів на метеорологічних станціях України в різні періоди спостереження та порівняємо їх з результатами традиційного аналізу часових рядів.

Насамперед було встановлено, що амплітуда річної гармоніки кількості атмосферних опадів (величина C_1) на території України зазвичай не перевищує 15 мм (табл. 1). Такою вона була на 82 метеорологічних станціях в 1961-1990 рр. та на 88 метеостанціях в 1991-2020 рр., що становить 53,6 % і 57,5 % від загальної кількості проаналізованих станцій (153). Як виявилося, у градаціях 0-5, 5-10 і 10-15 мм відбулися і найамасштабніші структурні зміни повторюваності величини C_1. Кількість метеорологічних станцій з найменшою амплітудою річної гармоніки опадів (до 5 мм) зменшилася на 5, а кількість метеорологічних станцій з амплітудами від 5 до 10 мм та від 10 до 15 мм збільшилася на 6 і 5, відповідно. Разом з тим, відносна повторюваність (частота) таких градацій змінилася несуттєво – тільки на 3-4 %. У повній відповідності до наших очікувань, в старших градаціях величини C_1 ці зміни були ще меншими, причому переважала тенденція до зменшення їх повторюваності. Іншими словами, амплітуда річної гармоніки кількості атмосферних опадів в Україні виявилася дуже консервативною характеристикою. На це вказує також великий коефіцієнт кореляції (0,960) між значеннями даної величини в різні

Таблиця 1 / Table 1

Повторюваність різних градацій амплітуди річної гармоніки кількості атмосферних опадів на метеорологічних станціях України. 1961-2020 рр. /
Repeatability of gradations of the amplitude of annual harmonic of atmospheric precipitation at weather stations in Ukraine, 1961-2020

Градації C_1, мм / Gradations of C_1, mm	1961-1990 рр. / 1961-1990		1991-2020 рр. / 1991-2020		Різницевий ряд / Residual series	
	число випадків / cases	відсотків / %	число випадків / cases	відсотків / %	число випадків / cases	відсотків / %
0-5	23	15,03	18	11,76	-5	-3,27
5-10	27	17,65	33	21,57	6	3,922
10-15	32	20,92	37	24,18	5	3,268
15-20	21	13,73	23	15,03	2	1,307
20-25	24	15,69	20	13,07	-4	-2,61
25-30	14	9,15	12	7,84	-2	-1,31
30-35	3	1,96	4	2,61	1	0,654
35-40	3	1,96	3	1,96	0	0
40-45	3	1,96	0	0,00	-3	-1,96
45-50	1	0,65	1	0,65	0	0
50-55	1	0,65	1	0,65	0	0
55-60	1	0,65	0	0,00	-1	-0,65
60-65	0	0,00	1	0,65	1	0,654
Разом / Total	**153**	**100,0**	**153**	**100,0**		

періоди спостереження.

Відомо, що амплітуда будь-якої окремої гармоніки охоплює тільки частину розмаху коливання випадкової величини, що нею апроксимується. Для вихідних рядів кількості атмосферних опадів річна амплітуда A (у традиційному розумінні цієї величини, як різниці кількості опадів у найвологіший і найсухіший місяці року) була приблизно утричі більша за середню амплітуду річної гармоніки C_1, а середнє квадратичне відхилення – приблизно удвічі більше (табл. 2). Відмітимо, що середні значення величини C_1 для різних періодів спостереження відрізнялися значно менше, ніж відповідні їм значення A, а зміни амплітуди річної гармоніки від одного періоду до другого (-0,52) виявилися навіть на цілий порядок меншими за середні зміни річної амплітуди (-5,65), що є дуже зручним для просторових узагальнень кліматичних змін, оскільки дозволяє усунути з розгляду значну частину випадкових подій. Потрібно зважати й на те, що при апроксимації річного ходу річною гармонікою помітно збільшується коефіцієнт варіації ряду.

Річна гармоніка робить найбільший внесок

у формування загальної дисперсії кількості атмосферних опадів. У 1961-1990 рр. середній внесок f_1 цієї гармоніки становив 52,3 %, а в 1991-2020 рр. він перевищив навіть 68,6 %. При цьому процеси зміни кількості атмосферних опадів на більшості метеорологічних станцій розвивалися досить узгоджено між собою: коефіцієнт кореляції між значеннями f_1 по вибірці станцій у різні періоди спостереження становив 0,881.

Також суттєвим є перерозподіл, що відбувся в останній 30-річці на користь старших градацій f_1 (рис. 1).

У всіх випадках, коли річна компонента сезонних коливань кількості атмосферних опадів виконує допоміжну роль, провідною стає півріч-

Таблиця 2 / Table 2

Зіставлення статистичних характеристик рядів амплітуди річної гармоніки C_1 та річної амплітуди A кількості атмосферних опадів на метеорологічних станціях України, 1961-2020 рр. / Statistics of the series of annual harmonic amplitude C_1 and annual amplitude A of atmospheric precipitation at weather stations in Ukraine. 1961-2020

Статистичні характеристики / Statistics	Ряди C_1, мм / Series of C_1, mm			Ряди A, мм / Series of A, mm		
	1961-1990	1991-2020	різницевий ряд / residual series	1961-1990	1991-2020	різницевий ряд / residual series
Максимум / Maxima	56,45	60,71	4,86	117	140	23
Мінімум / Minima	0,60	1,73	-10,71	15	13	-33
Середнє значення / Mean	16,02	15,50	-0,52	50,26	44,61	-5,65
СКВ / Standard deviation	10,78	9,74	3,08	19,57	20,23	8,55
Коефіцієнт варіації / Coefficient of variation	0,673	0,628	-5,933	0,389	0,454	-1,512

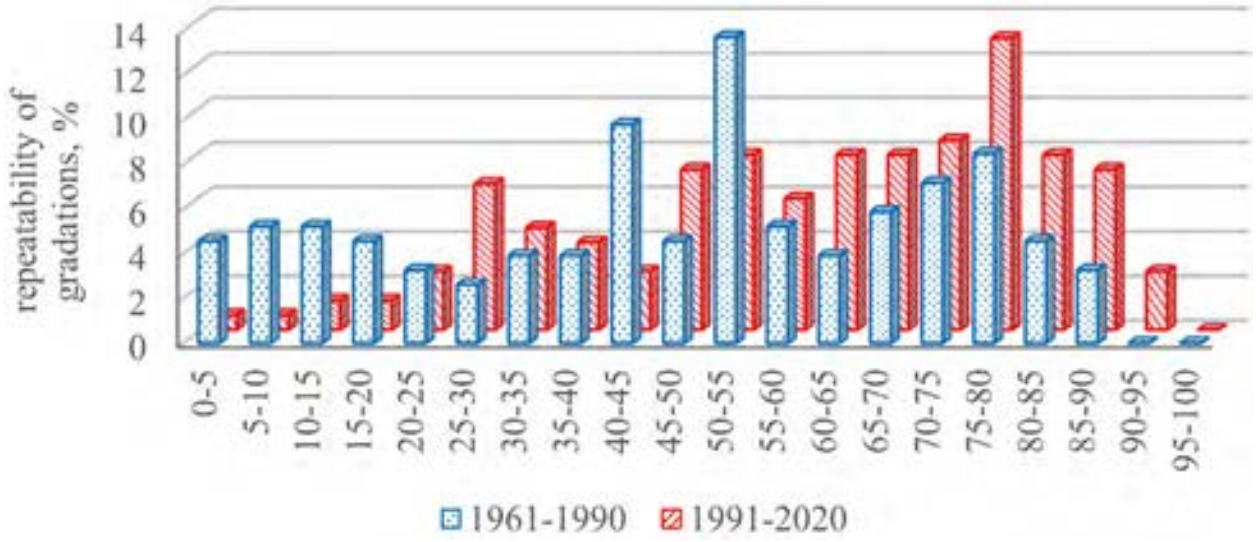


Рис. 1. Розподіл повторюваності градацій річної гармоніки за її внеском в сумарну дисперсію кількості атмосферних опадів в Україні, %. 1991-1990 та 1991-2020 рр. / Fig. 1. Statistical distribution of the repeatability of annual harmonic gradations according to its contribution to the total variance of rainfall annual cycle in Ukraine, %. 1961-1990 and 1991-2020

на гармоніка (рис. 2). Коефіцієнт кореляції між їх внесками у загальну дисперсію річного ходу кількості атмосферних опадів по усій вибірці станцій становить -0,936 у 1961-1990 рр. і -0,813 у 1991-2020 рр. Цікаво, що коефіцієнт лінійного тренду між параметрами f_1 та f_2 в другий період (-0,47) значно відрізняється від його значення в перший період (-0,771).

Зауважимо також, що в другий період спостереження піврічна гармоніка відіграє набагато більшу роль в менших градаціях величини f_2 (рис. 3).

З табл. 3 випливає, що практично на всій території України максимум річної гармоніки кількості опадів настає із середини червня ($t_1 = 6{,}0$ міс.) до середини серпня ($t_1 = 8{,}0$ міс.). Це відповідає усталеній думці [6] про те, що найбільша кількість опадів у нашій країні повсюдно випадає у червні-липні. Нечисленні відхилення від цього правила, які трапляються переважно у вузькій прибережній смузі на півдні України, мали б тільки підтверджувати його істинність (рис. 4).

Звернемо увагу на те, яку важливу роль віді-

грає піврічна гармоніка. Її амплітуда коливається від 4,0 до 27,5 мм у 1961-1990 рр. та від 1,6 до 16,4 мм у 1991-2020 рр., а фаза практично завжди лежить в діапазоні $t_2 = 0{,}0 \div 1{,}0$ міс. (99,3 % розглядуваних метеостанцій у 1961-1990 рр. та 78,4 % усіх станцій у 1991-2020 рр.), значно рідше $t_2 = 5{,}0 \div 6{,}0$ міс. (решта випадків). Завдяки цьому розширюється діапазон фактичного часу настання максимуму кількості опадів (див. рис. 4).

Ще ширшим діапазоном характеризується час настання найсухішого місяця року. Згідно з матеріалами, представленими в роботі [3], лівова частка таких випадків припадає на холодний період року, хоча доволі частими є й винятки з цього правила. Зокрема, в 1961-1990 рр. на 59 із

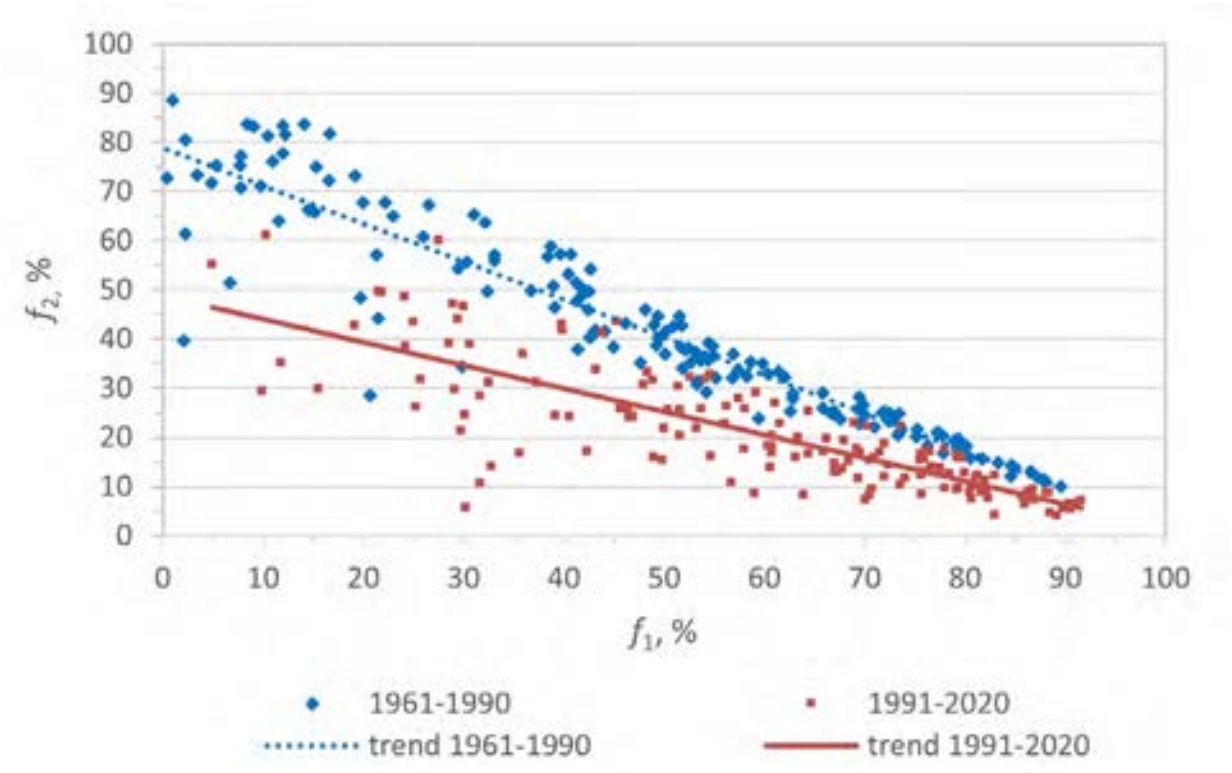


Рис. 2. Внесок річної (f_1) і піврічної (f_2) гармонік в загальну дисперсію річного ходу кількості атмосферних опадів, %. 1961-1990 і 1991-2020 рр. /
Fig. 2. Contribution of annual (f_1) and semi-annual (f_2) harmonics to the total variance of rainfall annual cycle in Ukraine, %. 1961-1990 and 1991-2020

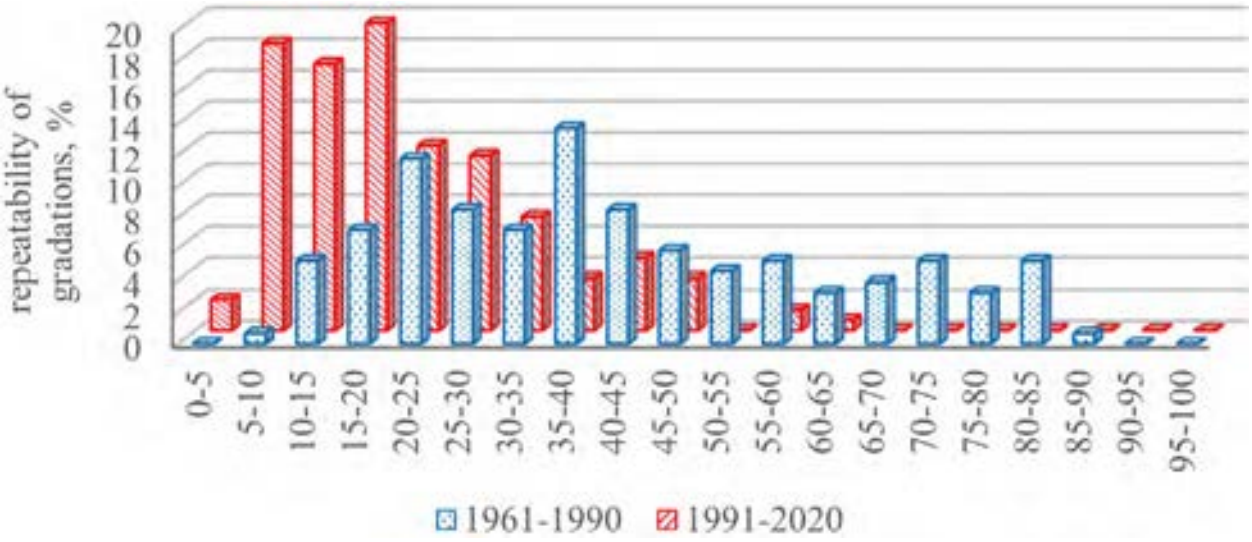


Рис. 3. Розподіл повторюваності градацій піврічної гармоніки за її внеском в сумарну дисперсію кількості атмосферних опадів в Україні, %. 1991-1990 та 1991-2020 рр. /
Fig. 3. Statistical distribution of the repeatability of semi-annual harmonic gradations according to its contribution to the total variance of rainfall annual cycle in Ukraine, %. 1961-1990 and 1991-2020

153 розглядуваних метеостанцій України (38,6 % загальної їх кількості) найсухішим місяцем року був жовтень, який традиційно відноситься до теплого періоду. В наступні 30 років відбулися дуже значні зрушення в часі настання цієї події. З усіх місяців теплого періоду року найсухішим став квітень (21 станція, або 13,7 % їх кількості), а жовтень залишився таким тільки для двох метеостанцій (1,3 %). Структурні зміни, які відбулися в розподілі часу настання найсухішого місяця року навіть всередині холодного періоду року також були дуже великими.

Таблиця 3 / Table 3

Повторюваність різних градацій часу настання максимуму річної гармоніки кількості атмосферних опадів на метеорологічних станціях України, міс. 1961-2020 рр. /
Repeatability of gradations of the timing of annual harmonic rainfall maxima at weather stations in Ukraine, months, 1961-2020

Градації t_1, міс. / Gradations of t_1, months	1961-1990 рр. / 1961-1990		1991-2020 рр. / 1991-2020		Різницевий ряд / Residual series	
	число випадків / cases	відсотків / %	число випадків / cases	відсотків / %	число випадків / cases	відсотків / %
0-1	0	0,00	0	0,00	0	0,00
1-2	2	1,31	2	1,31	0	0,00
2-3	0	0,00	1	0,65	1	0,65
3-4	0	0,00	0	0,00	0	0,00
4-5	0	0,00	0	0,00	0	0,00
5-6	0	0,00	0	0,00	0	0,00
6-7	103	67,32	99	64,71	-4	-2,61
7-8	35	22,88	35	22,88	0	0,00
8-9	2	1,31	5	3,27	3	1,96
9-10	2	1,31	2	1,31	0	0,00
10-11	2	1,31	1	0,65	-1	-0,65
11-12	7	4,58	8	5,23	1	0,65
Разом / Total	**153**	**100,0**	**153**	**100,0**		

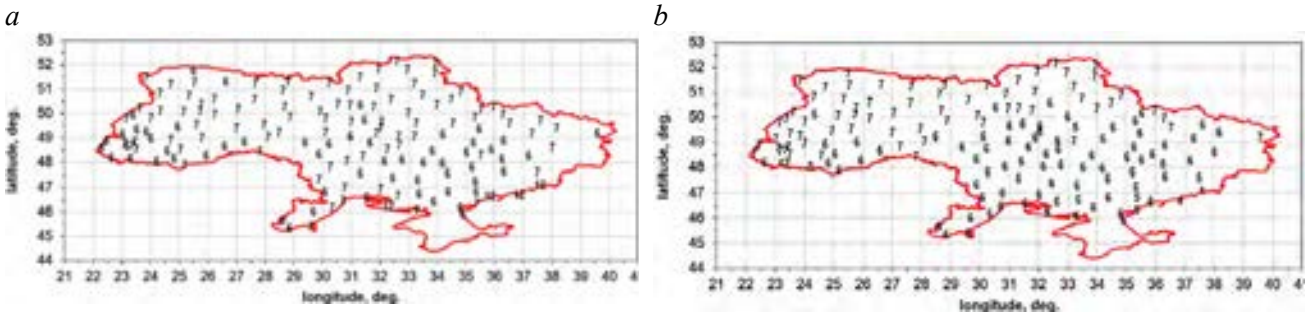


Рис. 4. Найвологіший місяць року (номер) в Україні: а) 1961-1990 рр.; б) 1991-2020 рр. /
Fig. 4. Wettest month of the year (number) in Ukraine: *a*. 1961-1990; *b*. 1991-2020

З позицій гармонічного аналізу, якщо обмежитися апроксимацією річного ходу кількості опадів тільки річною гармонікою, то найсухіший місяць року за визначенням має наставати в протифазі до найвологішого місяця, тобто переважно із середини грудня до середини лютого (див. табл. 3). Однак, зважаючи на наявність інших періодичних коливань, насамперед піврічних, це може відбуватися і в інший час. Останнім часом досягнуто кращого розуміння причин і природи піврічних коливань циркуляції атмосфери [10, 15, 22], які потенційно можуть спричинити відповідні приховані періодичності в коливаннях річного ходу кількості опадів.

Імовірною причиною показаних вище змін режиму зволоження на території України могли бути великомасштабні коливання циркуляції атмосфери в Атлантико-Європейському секторі, які можуть зберігати періодичність (когерентність) протягом тривалого періоду.

4. Висновки

Таким чином, у даному дослідженні представлено докладну характеристику річного ходу атмосферних опадів на території України. Завдя-

ки застосуванню методів кліматологічного та гармонічного аналізу поставлені завдання вирішено в повному обсязі. Отримано низку нетривіальних результатів, що дозволяє сформулювати такі висновки.

1. Режим атмосферних опадів в Україні в період сучасного глобального потепління (1991-2020 рр.) значно змінився порівняно з 30-річним періодом 1961-1990 рр., який йому передував. На це вказують великі абсолютні та відносні зміни річних та місячних сум опадів в розрізі окремих метеорологічних станцій. Вперше виявлено, що особливістю сучасного режиму зволоження в Україні є значні, нерідко протилежні за знаком, коливання річних сум атмосферних опадів навіть на сусідніх метеостанціях.

2. В роботі вперше ґрунтовно розглянуто значні структурні перетворення сезонного режиму атмосферних опадів в Україні, які відбулися в сучасний період глобального потепління (1991-2020 рр.). Зокрема, це проявилося в послабленні тісноти і частковій зміні характеру оберненого зв'язку між річною та півріччною гармоніками.

3. Як звичайний кліматологічний аналіз, так і гармонічний аналіз вказують, що максимальна кількість опадів в Україні зазвичай досягається влітку, а мінімальна – в холодний період року. Однак, якщо максимум кількості опадів в розрізі окремих метеостанцій припадає переважно тільки на два місяці року (червень і липень) і описується чітким одномодальним розподілом, то мінімум річного ходу, навпаки, дуже розмитий і на більшості метеостанцій буває в різних, не завжди суміжних місяцях холодного періоду року. Крім того, якщо в часовій структурі найсухіших місяців року першого періоду спостереження було дві добре виражені моди (жовтень і січень-березень), то в другому періоді спостереження жовтнева мода взагалі зникла.

Гармонічний аналіз вперше дозволив встановити, що максимум річної гармоніки кількості опадів зміщений відносно фактичного максимуму річного ходу опадів на пів місяця і настає із середини червня до середини серпня. Гармонічний аналіз також показав, що від одного періоду спостереження до іншого відбулися значні зміни у фазовій структурі річної гармоніки, а також в інтенсивності та ролі річної і півріччної гармонік, що також відмічається вперше. Найімовірнішою причиною зазначених зрушень слід назвати зміни в характері циркуляції атмосфери над усім Атлантико-Європейським сектором Північної півкулі, хоча вплив місцевих чинників кліматоутворення виключати повністю також не можна.

Список використаних джерел

1. *Водчиць, О.Г., Затула, В.І. (2017). Основи метеорології і кліматології. Київ : НАУ, 360.*
2. *Затула, В.І. (2017). Виявлення прихованих періодичностей сезонних коливань метеорологічних величин на території Волинського Полісся. Фізична географія та геоморфологія, 1(85), 101–105.*
3. *Затула, В. (2024). Комплексна оцінка посушливості клімату України. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», (61), 180–192. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-15.*
4. *Затула, В.І., Затула, Н.І. (2014). Гармонічний аналіз сезонних коливань деяких метеорологічних величин на території України. Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія, 2(33), 98–103.*
5. *Затула, В.І., Затула, Н.І. (2017). Виявлення прихованих періодичностей сезонних коливань метеорологічних величин на території Житомирського Полісся, 1(44), 114–120.*
6. *Ліпінський, В.М., Дячук, В.А., Бабіченко, В.М. ред. (2003). Клімат України. Київ : Вид-во Раєвського, 343.*
7. *Холявчук, Д.І. (2019). Регіональна кліматологія. Чернівці : Чернівец. нац. ун-т ім. Юрія Федьковича, 168.*
8. *Blüthgen, J. (1966). Allgemeine Klimageographie. Berlin, Boston: De Gruyter. https://doi.org/10.1515/9783111440293.*
9. *Boucher, K.R. (1987). Europe, climate of. In: The Encyclopedia of Climatology. Ed. by John E. Oliver. New York, 355–367.*
10. *Chen, T.-C., Wu, K.-D. (1992). Semi-annual oscillation of the global divergent circulation. Tellus, 44A, 357–365.*
11. *Cui, D., Liang, S., Wang, D. (2021). Observed and projected changes in global climate zones based on Köppen climate classification. WIREs Climate change, 12(3), e701. https://doi.org/10.1002/wcc.701.*
12. *Fabiano, F., Meccia, V.L., Davini, P., Ghinassi, P. Corti, S. (2021). A regime view of future atmospheric circulation changes in northern mid-latitudes. Weather and Climate Dynamics, 2(1), 163–180. https://doi.org/10.5194/wcd-2-163-2021.*
13. *Gardner, A.S., Maclean, I.M.D., Gaston, K.J. (2020). A new system to classify global climate zones based on plant physiology and using high temporal resolution climate data. Journal of Biogeography, 47, 2091–2101. https://doi.org/10.1111/jbi.13927.*
14. *Gründemann, G.J., Zorzetto, E., van de Giesen, N., van der Ent, R.J. (2023). Historical shifts in seasonality and timing of extreme precipitation. Geophysical Research Letters, 50, e2023GL105200. https://doi.org/10.1029/2023GL105200.*
15. *Jaison, A.M., Gray, L.J., Osprey, S., Smith, A.K., Garcia, R.R. (2024). A momentum budget study of the semi-annual oscillation in the Whole Atmosphere Community Climate Model. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 150(763), 3544–3565. https://doi.org/10.1002/qj.4782.*

16. Karwat, A., Franzke, C.L.E., Blender, R. (2022). Long-term trends of Northern Hemispheric winter cyclones in the extended ERA5 reanalysis. Journal of geophysical research: Atmospheres, 127(22), e2022JD036952. https://doi.org/10.1029/2022JD036952.
17. Kholiavchuk, D. (2022). Changes in the atmospheric circulation types over western Ukraine in the 20th-21st centuries. Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Geography, 3/4 (84/85), 39–45. https://doi.org/10.17721/1728-2721.2022.85.2.
18. Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorologische Zeitschrift, 15, 259–263. https://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130.
19. Mimić, G., Podraščanin, Z., Basarin, B. (2024). Change detection of the Köppen climate zones in Southeastern Europe. Atmospheric Science Letters, 25(11), e1270. https://doi.org/10.1002/asl.1270.
20. Navarro, A., Merino, A., García-Ortega, E., and Tapiador, F.J. (2025). Uncertainty maps for model-based global climate classification systems. Scientific Data, 12, 35. https://doi.org/10.1038/s41597-025-04387-0.
21. Rousi, E., Selten, F., Rahmstorf, S., Coumou, D. (2021). Changes in North Atlantic Atmospheric Circulation in a Warmer Climate Favor Winter Flooding and Summer Drought over Europe. Journal of Climate, 34, 2277–2295. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0311.1.
22. Shangguan, M., Wang, W. (2022). The semi-annual oscillation (SAO) in the upper troposphere and lower stratosphere (UTLS). Atmospheric Chemistry and Physics, 22(14), 9499–9511. https://doi.org/10.5194/acp-22-9499-2022.
23. Shimabukuro, R., Tomita, T., Fukui, K.-ichi. (2023). Update of global maps of Alisov's climate classification. Progress in Earth and Planetary Science, 10:19. https://doi.org/10.1186/s40645-023-00547-1.
24. Song, Y.H., Chung, E.-S., Ayugi, B.O. (2025). CMIP6 GCMs projected future Koppen-Geiger climate zones on a global scale. Earth's Future, 13, e2023EF004401. https://doi.org/10.1029/2023EF004401.
25. Wilks, D.S. (2006). Statistical methods in the atmospheric sciences. 2nd edn. Amsterdam, 630.
26. Zatula, V.I. (2018). Decomposition and modelling of the annual cycle of meteorological variables in the Ukrainian Carpathians. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", 49, 95–106. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2018-49-08.

Present tendencies of annual cycle rainfall change in Ukraine

Vasyl Zatula
PhD (Geography), Associate Professor,
Department of Meteorology and Climatology,
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

ABSTRACT

Introduction. The precipitation regime, its amount and distribution throughout the year are an important component of the climate characteristics. This information is of exceptional importance in the planning and management of water resources.

The purpose of article is to present an expanded description of the annual cycle of atmospheric precipitation in Ukraine and to identify the most important features of its change over the period 1961-2020.

Data and methods. This paper examines the features of the annual cycle of atmospheric precipitation in the continental part of Ukraine. The research is based on data from climatological reference books at 153 weather stations across the country. Much attention is paid to the parameters of the harmonic analysis of the initial observation series in 1961-1990 and 1991-2020 and the residual series formed on their basis with changes in precipitation, primarily the amplitude C_1 and the phase t_1 of the annual harmonic, as well as its contribution f_1 to the total variance of monthly precipitation series.

Results. Changes in the repeatability of gradations of the amplitude of the annual harmonic of atmospheric precipitation are analyzed. A comparison of the statistics of the series of the annual harmonic amplitude C_1 and annual amplitude A of atmospheric precipitation at weather stations of Ukraine during 1961-1990 and 1991-2020 is carried out. Changes in the statistical distributions of the repeatability of gradations of annual and semi-annual harmonics by their contribution to the total variance of rainfall annual cycle in Ukraine in different observation periods were considered. The repeatability of gradations of the timing of annual harmonic of atmospheric precipitation maxima in these periods is analyzed. Significant spatial heterogeneities in the distribution of annual and monthly precipitation amounts were found. Harmonic analysis also allowed us to identify important patterns within the annual cycle. The main role in seasonal fluctuations in monthly precipitation amounts is played by the annual, and less often - semi-annual harmonics. During the transition from the first observation period (1961-1990) to the second (1991-2020), the inverse relationship between the parts of the variance caused by these harmonics noticeably weakened (the coefficient of determination R^2 between the parameters f_1 and f_2 of the annual and semi-annual harmonics decreased from 0.876 to 0.661). At the same time, the slope of the linear relationships between these parameters significantly decreased (the coefficient of the linear regression equation changed from -0.771 to -0.47).

The scientific novelty. It has been established that the amplitude and phase structure of the annual harmonic, as well as the relative role of the annual and semi-annual harmonics of monthly precipitation in the current climate, have undergone significant changes. This is probably due to changes in the nature of atmospheric circulation over the entire Atlantic-European sector, although the influence of local climate-forming factors cannot be completely excluded either.

Practical significance. The identified changes in the phase structure and other characteristics of the annual harmonics of monthly precipitation series contribute to a better understanding of current trends in the evolution of the regional climate system in Ukraine and will be useful for long-term climate change forecasting.

Keywords: *annual cycle, harmonics, amplitude, phase, regression analysis, repeatability, total precipitations, climate change, Ukraine.*

References

1. *Vodchyts, O.G., Zatula, V.I. (2017). Fundamentals of meteorology and climatology. Kyiv, Ukraine, 360. [in Ukrainian]*
2. *Zatula, V.I. (2017). Identifying of the hidden periodicities of seasonal oscillations of meteorological variables on the territory of Volyn Polissya. Physical geography and geomorphology, 1(85), 101–105. [in Ukrainian]*
3. *Zatula, V. (2024). Complex assessing of aridity in Ukraine. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (61), 180–192. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-15. [in Ukrainian]*
4. *Zatula, V.I., Zatula, N.I. (2014). Harmonic analysis of seasonal oscillations of some meteorological variables on Ukrainian territory. Hydrology, hydrochemistry and hydroecology, 2(33), 98–103. [in Ukrainian]*
5. *Zatula, V.I., Zatula, N.I. (2017). Identifying of the hidden periodicities of seasonal oscillations of meteorological variables on the territory of Zhytomyr Polissya. Hydrology, hydrochemistry and hydroecology, 1(44), 114–120. [in Ukrainian]*
6. *Lipinsky V.M., Dyachuk V.A., Babichenko V.M. eds. (2003). Climate of Ukraine. Kyiv, Ukraine*, 343.
7. *Kholiavchuk, D.I. (2019). Regional climatology. Chernivtsi, Ukraine, 168. [in Ukrainian]*
8. *Blüthgen, J. (1966). General Climatic Geography. Berlin, Boston: De Gruyter. https://doi.org/10.1515/9783111440293. [in German]*
9. *Boucher, K.R. (1987). Europe, climate of. In: The Encyclopedia of Climatology. Ed. by John E. Oliver. New York, 355–367.*
10. *Chen, T.-C., Wu, K.-D. (1992). Semi-annual oscillation of the global divergent circulation. Tellus, 44A, 357–365.*
11. *Cui, D., Liang, S., Wang, D. (2021). Observed and projected changes in global climate zones based on Köppen climate classification. WIREs Climate change, 12(3), e701. https://doi.org/10.1002/wcc.701.*
12. *Fabiano, F., Meccia, V.L., Davini, P., Ghinassi, P. Corti, S. (2021). A regime view of future atmospheric circulation changes in northern mid-latitudes. Weather and Climate Dynamics, 2(1), 163–180. https://doi.org/10.5194/wcd-2-163-2021.*
13. *Gardner, A.S., Maclean, I.M.D., Gaston, K.J. (2020). A new system to classify global climate zones based on plant physiology and using high temporal resolution climate data. Journal of Biogeography, 47, 2091–2101. https://doi.org/10.1111/jbi.13927.*
14. *Gründemann, G.J., Zorzetto, E., van de Giesen, N., van der Ent, R.J. (2023). Historical shifts in seasonality and timing of extreme precipitation. Geophysical Research Letters, 50, e2023GL105200. https://doi.org/10.1029/2023GL105200.*
15. *Jaison, A.M., Gray, L.J., Osprey, S., Smith, A.K., Garcia, R.R. (2024). A momentum budget study of the semi-annual oscillation in the Whole Atmosphere Community Climate Model. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 150(763), 3544–3565. https://doi.org/10.1002/qj.4782.*
16. *Karwat, A., Franzke, C.L.E., Blender, R. (2022). Long-term trends of Northern Hemispheric winter cyclones in the extended ERA5 reanalysis. Journal of geophysical research: Atmospheres, 127(22), e2022JD036952. https://doi.org/10.1029/2022JD036952.*
17. *Kholiavchuk, D. (2022). Changes in the atmospheric circulation types over western Ukraine in the 20th-21st centuries. Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Geography, 3/4 (84/85), 39–45. https://doi.org/10.17721/1728-2721.2022.85.2.*
18. *Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorologische Zeitschrift, 15, 259–263. https://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130.*
19. *Mimić, G., Podraščanin, Z., Basarin, B. (2024). Change detection of the Köppen climate zones in Southeastern Europe. Atmospheric Science Letters, 25(11), e1270. https://doi.org/10.1002/asl.1270.*
20. *Navarro, A., Merino, A., García-Ortega, E., and Tapiador, F.J. (2025). Uncertainty maps for model-based global climate classification systems. Scientific Data, 12, 35. https://doi.org/10.1038/s41597-025-04387-0.*
21. *Rousi, E., Selten, F., Rahmstorf, S., Coumou, D. (2021). Changes in North Atlantic Atmospheric Circulation in a Warmer Climate Favor Winter Flooding and Summer Drought over Europe. Journal of Climate, 34, 2277–2295. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0311.1.*
22. *Shangguan, M., Wang, W. (2022). The semi-annual oscillation (SAO) in the upper troposphere and lower stratosphere (UTLS). Atmospheric Chemistry and Physics, 22(14), 9499–9511. https://doi.org/10.5194/acp-22-9499-2022.*
23. *Shimabukuro, R., Tomita, T., Fukui, K.-ichi. (2023). Update of global maps of Alisov's climate classification. Progress in Earth and Planetary Science, 10:19. https://doi.org/10.1186/s40645-023-00547-1.*
24. *Song, Y.H., Chung, E.-S., Ayugi, B.O. (2025). CMIP6 GCMs projected future Koppen-Geiger climate zones on a global scale. Earth's Future, 13, e2023EF004401. https://doi.org/10.1029/2023EF004401.*
25. *Wilks, D.S. (2006). Statistical methods in the atmospheric sciences. 2nd edn. Amsterdam, 630.*
26. *Zatula, V.I. (2018). Decomposition and modelling of the annual cycle of meteorological variables in the Ukrainian Carpathians. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", 49, 95–106. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2018-49-08.*

Received 6 August 2025
Accepted 28 September 2025

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-17
УДК 528.94:551.46+504.5:556.5(477.87)
Надійшла 9 серпня 2025 р.
Прийнята 5 жовтня 2025 р.

Інструментальне дослідження та картографування озера Синевир: інтеграція методів дистанційного зондування для геоекологічного моніторингу водно-болотного угіддя

Іван Калинич [1]
к. техн. н., доцент, декан географічного факультету,
[1] Ужгородський національний університет, м. Ужгород, Україна
e-mail: ivan.kalynych@uzhnu.edu.ua, https://orcid.org/0000-0002-5213-3417;
Микола Карабінюк [1]
к. геогр. н, доцент, кафедра фізичної географії та раціонального природокористування,
e-mail: mykola.karabiniuk@uzhnu.edu.ua, https://orcid.org/0000-0001-9852-7692;
Марія Ничвид [1]
ст. викладач кафедри геодезії, землеустрою та геоінформатики,
e-mail: mariya.nychvyd@uzhnu.edu.ua, https://orcid.org/0000-0001-5661-8799;
Іван Проданець [2]
директор, [2] Закарпатська регіональна філія ДП «УкрДАГП»,
e-mail: geodezcentre@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-6377-4023;
Олексій Примак [3]
директор, [3] Приватне підприємство «Геодезична Інжинірингова Агенція»,
e-mail: prymak.alex@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-4605-6468;
Василь Плиска [4]
зав. лабораторії опрацювання спостережень ГНСС,
[4] Центр управління Української постійно діючої мережі ГНСС,
e-mail: vasplyska@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-1217-6022

Дослідження присвячене створенню високоточної топографічної основи для озера Синевир – одного з найважливіших водно-болотних угідь Карпатського регіону міжнародного значення. З огляду на зростаючий вплив антропогенних факторів і кліматичних змін, актуальним є впровадження довготривалого геоекологічного моніторингу стану озерної екосистеми. У роботі реалізовано інтеграцію методів дистанційного зондування земної поверхні та гідроакустичного батиметричного знімання для формування комплексної картографічної бази. Методологія включає використання безпілотних літальних апаратів із системою LiDAR, фотограмметричну обробку зображень високої роздільної здатності, а також ехолотне сканування дна озера з GNSS-прив'язкою. Обробка даних здійснювалася у спеціалізованому програмному забезпеченні (Terrasolid, Agisoft Metashape, Trimble HYDROpro, Digitals), що дозволило створити цифрову модель місцевості, ортофотоплан, TIN-модель дна і топографічний план. Уперше для озера Синевир проведено повний цикл високоточних інструментальних картографічних робіт, у результаті яких було побудовано ортофотоплан із роздільною здатністю 5,9 см/пікс, отримано батиметричні дані з точністю ±0,1 м, визначено максимальну глибину озера (19,98 м) та розроблено 3D-модель дна з гіпсометричними профілями. Ключовим результатом стало створення топографічного плану в масштабі 1:1 000, який може слугувати базою для подальших наукових досліджень і моніторингових програм. Наукова новизна полягає у першому застосуванні комплексного підходу до інструментального картографування гірського озера із поєднанням лідарного знімання, аерофотозйомки з БПЛА та батиметричного сканування. Це забезпечило отримання нової просторової інформації щодо морфології озерного ложа та створення багатокомпонентної системи геопросторових даних. Практична значущість дослідження полягає в адаптивності запропонованої методики до інших природоохоронних об'єктів Карпат, що робить її цінною для транснаціональних екологічних ініціатив та інтегрованого управління територіями з особливим статусом охорони.

Ключові слова*: озеро Синевир, Українські Карпати, водно-болотне угіддя, батиметрія, дистанційне зондування, топографічне знімання, геоекологічний моніторинг.*

Як цитувати: Калинич Іван, Карабінюк Микола, Ничвид Марія, Проданець Іван, Примак Олексій, Плиска Василь (2025). Інструментальне дослідження та картографування озера Синевир: інтеграція методів дистанційного зондування для геоекологічного моніторингу водно-болотного угіддя. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*, (63), 221-233. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-17

In cites: Kalynych Ivan, Karabiniuk Mykola, Nychvyd Mariia, Prodanets Ivan, Prymak Oleksii, Plyska Vasyl (2025). Instrumental Study and Mapping of Lake Synevyr: Remote Sensing Integration for Wetland Geoecological Monitoring. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 221-233. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-17 [in Ukrainian]

Постановка проблеми. Зростання антропогенного впливу на довкілля та зміни ландшафтної структури гірської системи Карпат в умовах інтенсивних змін клімату вимагають застування комплексних підходів та сучасних методів у вивченні цінних об'єктів навколишнього середовища з метою їх збереження. Також прояви глобальних змін та аридизація кліматичних умов в

© Калинич Іван, Карабінюк Микола, Ничвид Марія, Проданець Іван, Примак Олексій, Плиска Василь, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Українських Карпатах впливають на особливості функціонування, процеси циркуляції та вологообмін в геокомплексах гірської системи [1, 2]. У результаті найбільшої загрози зникнення на сьогодні зазнають унікальні геокомплекси високогірного ландшафтного ярусу із характерним поширенням реліктових аркто-альпійських видів рослин та водно-болотні угіддя (ВБУ), які є цінними елементами природного середовища. Властивості та функціонування останніх тісно залежить від генезису гідрологічного об'єкту й сучасних гідро-кліматичних умов території їх розташування [3]. Водно-болотні угіддя та оточуючі їх геокомплекси мають важливе значення для формування і стабілізації гідрологічного балансу в Українських Карпатах, а також відіграють ключову роль у збереженні біорізноманіття та виконують важливі екосистемні функції – від очищення води і збереження вологості до регулювання мікроклімату [4, 5]. Із всього різноманіття водно-болотних угідь Українських Карпат особливе місце займають озера, збереження яких на сьогодні належить до пріоритетних завдань тут природоохоронної діяльності.

До унікальних водно-болотних угідь міжнародного значення Українських Карпат належить озеро Синевир, що знаходиться у верхів'ї басейну річки Теребля в межах Національного природного парку «Синевир» [6]. Воно є найбільшим озером української частини гірської системи із загальним об'ємом водної маси в діапазоні 350-460 тис. м^3 і вирізняється своєрідними генетично-морфологічними рисами. Водно-болотне угіддя у складі з озером Синевир займає площу 29 га і знаходиться на території Синевирської територіальної громади Хустського району Закарпатської області. Територія угіддя також входить до буферної зони об'єкта Всесвітньої природної спадщини ЮНЕСКО «Букові праліси і давні ліси Карпат та інших регіонів Європи» [6]. Зважаючи на естетичну цінність, високе ландшафтне та біологічне різноманіття території, цікаві історико-культурні риси місцевості та інші фактори, озеро Синевир є одним із основних природних рекреаційно-туристичних об'єктів Закарпатської області та Українських Карпат загалом. В умовах прогресивного рекреаційного навантаження на озеро Синевир на фоні підтверджених кліматичних змін, порушень в гідрологічному режимі річок та загальної інтенсифікації процесів деградації водно-болотних угідь в Українських Карпатах на сьогодні актуальним є впровадження комплексного геоекологічного моніторингу водно-болотного угіддя на основі новітніх принципі і методів та з використанням сучасних технологій.

Для розробки ефективної програми моніторингу та реалізації комплексного наукового дослідження озера Синевир першочерговим завданням є розробка якісного крупномасштабного картографічного матеріалу із можливістю подальшої цифрової обробки геоданих у спеціалізованому програмному середовищі. Розробка вихідної картографічної основи є необхідністю для подальшого ландшафтного картографування, дослідження морфологічної структури та морфометричного аналізу території озерно-басейнової системи, оцінки розвитку ерозійно-акумулятивних процесів у водозборі озера Синевир та ін. Найефективнішим способом картографування озера Синевир та розробки відповідної топографічної основи із необхідною для виконання подальших досліджень точністю та деталізацією є застосування методів дистанційного зондування у поєднанні з батиметрією озерного ложа.

Метою дослідження є розробка топографічного плану дна озера Синевир та прилеглої території на основі результатів власних інструментальних досліджень методами дистанційного зондування за допомогою технології LiDAR у поєднанні з гідроакустичним методом батиметричного знімання озерного ложа. Також обґрунтувати методичні особливості та технічні аспекти картографування озера Синевир в своєрідних умовах гірської місцевості Українських Карпат з метою підготовки картографічного матеріалу та передумов для організації довготривалого геоекологічного моніторингу водно-болотного угіддя міжнародного значення у Карпатському регіоні.

Аналіз останніх джерел та публікацій. Аналіз опублікованих наукових праць свідчить, що детальні географічні дослідження та картографування озер Українських Карпат розпочалися в другій половині XX ст. Основна увага науковців тоді була присвячена вивченню морфологічних особливостей та картографуванню головно реліктових високогірних озер льодовикового походження гірських масивів Чорногора та Свидовець, які безпосередньо зазнали впливу плейстоценових зледенінь. Наприклад, у процесі дослідження льодовикових озер Чорногори у 1964 році відомий дослідних гірських ландшафтів Українських Карпат Г. Міллер завершив батиметричні знімання та уклав відповідні батиметричні карти для озер Бребенескул (переріз ізобат через 0,5 м) та Верхнє Озеро урочища Озірне (переріз ізобат через 4 м) [7].

Подальші дослідження особливостей озер Українських Карпат головно стосувалися аналізу територіального поширення, особливостей геоморфологічної будови та структури сучасних донних відкладів [8]. На особливу увагу заслуговують результати гідробіологічного дослідження екосистем лентичних водойм під керівництвом Т.

Микітчака, які головно присвячені озерам та озерець гірського масиву Чорногора [3, 9]. Ці дослідження супроводжувалися розробкою картографічних матеріалів і визначенням координат розміщення озер та озерець в Чорногорі, а також було виконано картографування приозерної території та обрисів акваторії високогірних озер, заростей на дослідних ділянках осоки, чагарників тощо [3, 9].

Батиметричні дослідження озер Українських Карпат продовжені у 2010-х роках з метою вивчення геоморфологічних та морфометричних особливостей озерних улоговин на території Чорногірського та Свидовецького масивів [10]. У результаті було реалізовано батиметрію озер Апшинець, Драгобратське (Верхнє і Нижнє), Ворожеське (Верхнє і Нижнє) та Герешаска (Догяска), а також проаналізовано особливості поширення гравітаційних процесів (зсуви, обвали, осипи) в межах водозбірних басейнів (карів) [10]. Пізніше у результаті зростання антропогенного впливу на водно-болотні угіддя Українських Карпат головно з боку рекреаційно-туристичної діяльності впродовж останнього десятиліття зросла увага науковців (О. Антошика [11], М. Карабінюка та ін. [12] тощо) до проблем антропопресії на озера та оцінки ступеня перетвореності геокомплексів приозерних територій, що супроводжується відповідним картографуванням.

Таким чином, попередні дослідження і картографування озер та водно-болотних угідь Українських Карпат головно ґрунтувалися на основі батиметричних вимірювань та натурних обстежень прибережної території, що супроводжувалося укладанням карт. Використання спеціалізованого обладнання у процесі картографування озер гірської системи у минулому було суттєво обмеженим без застосування інструментів дистанційного зондування чи гідроакустичного батиметричного знімання. Сучасне картографування водно-болотних угідь потребує використання високоточних геопросторових даних через їхню динамічну природу та сезонні зміни, отримання яких можливе виключно на основі використання новітніх методів дистанційного зондування та завдяки використання професійного спеціалізованого обладнання наземного знімання [13]. Дистанційне зондування дозволяє ефективно визначати межі акваторії озер на основі фактичного рівня води, картографувати морфологічні особливості прибережної території та реальну просторову структуру рослинного покриву, об'єкти довкілля тощо. Застосування гідроакустичних методів для батиметричного знімання і картографування озерного ложа дозволяє детально дослідити глибини, форму та нерівності дна, отримуючи цифрові моделі рельєфу та детальні карти глибин [14].

На сьогодні дистанційне зондування та гідроакустичні методи батиметрії активно використовуються і розвиваються у світі для дослідження гірських озер, а також їх моніторингу на фоні природної еволюції й антропогенних змін [15, 16]. В Україні також відбувається активне впровадження цих засобів у дослідження озер різних регіонів та їх картографування у комплексі з використанням сучасних геоінформаційних технологій. На особливу увагу заслуговують результати ландшафтно-лімнологічних і геоекологічних досліджень озер Полісся та відповідні картографічні розробки вітчизняних науковців на основі батиметрії, дистанційного зондування, наземного картографування, натурного обстеження та інших методичних прийомів [15, 17]. Також реалізовані дослідження на прикладі озер Полісся підтверджують значимість картографування та актуальність створення кадастру водної болотних угідь на основі геоінформаційних систем для оптимізації їх геоекологічного стану та природоохоронних функцій національних парків [14, 18, 19].

Для якісної підготовки картографічного матеріалу та обґрунтування алгоритму застосування методів дистанційного зондування для цілей подальшого геоекологічного моніторингу озера Синевир важливе значення мають напрацювання групи дослідників під керівництвом В. Мартинюка та І. Зубковича [20, 21]. Їхній досвід картографування та організації батиметричного знімання озерного ложа, обґрунтовані теоретико-методичні основи геоекологічного моніторингу та оцінки сучасного геоекологічного стану озер у межах національних природних парків Полісся враховано у наших дослідженнях озера Синевир як найціннішого природного об'єкту Національного природного парку «Синевир» (рис. 1). Наші дослідження також враховують результати попереднього тематичного картографування улоговини озера Синевир, які були виконані в рамках геоморфологічного обстеження рельєфу дна та вивчення процесів нагромадження донних відкладів [22].

Матеріал і методи досліджень. Інструментальне дослідження та картографування озера Синевир в контексті розробки картографічного матеріалу для підготовки та впровадження довгострокового моніторингу ґрунтується на зніманні безпілотним літальним апаратом (БПЛА), оснащеним системою LiDAR, у комплексі з цифровим аерофотозніманням (із подальшою фотограмметричною обробкою зображень) та гідроакустичною батиметрією за допомогою ехолотного зондуванням днища озерного ложа. Реалізація комплексу таких знімальних робіт для водно-

болотних угідь в Українських Карпатах проводиться вперше, а тому важливим завданням на цьому етапі є загальне окреслення алгоритму виконання дослідження та технічних аспектів налаштування спеціалізованого обладнання.

Загалом, LIDAR як активний датчик, відбиває мільйони лазерних точок від поверхонь, які дають детальне уявлення про морфологію та структур земної поверхні, розподіл рослинності, інфраструктуру та топографію з абсолютною вертикальною точністю до кількох сантиметрів [14]. Застосування сучасних методів дистанційного зондування забезпечило якісне знімання об'єкту нашого дослідження озера Синевир та прибережної території в оптичному діапазоні спектра цифровою аерофотокамерою із подальшою обробкою отримуваних зображень методами фотограметрії [14]. Їхньою перевагою є можливість швидкого отримання результатів з великою кількістю просторових даних, високою точністю та деталізацією.

Лідарне знімання озера Синевир та прибе-

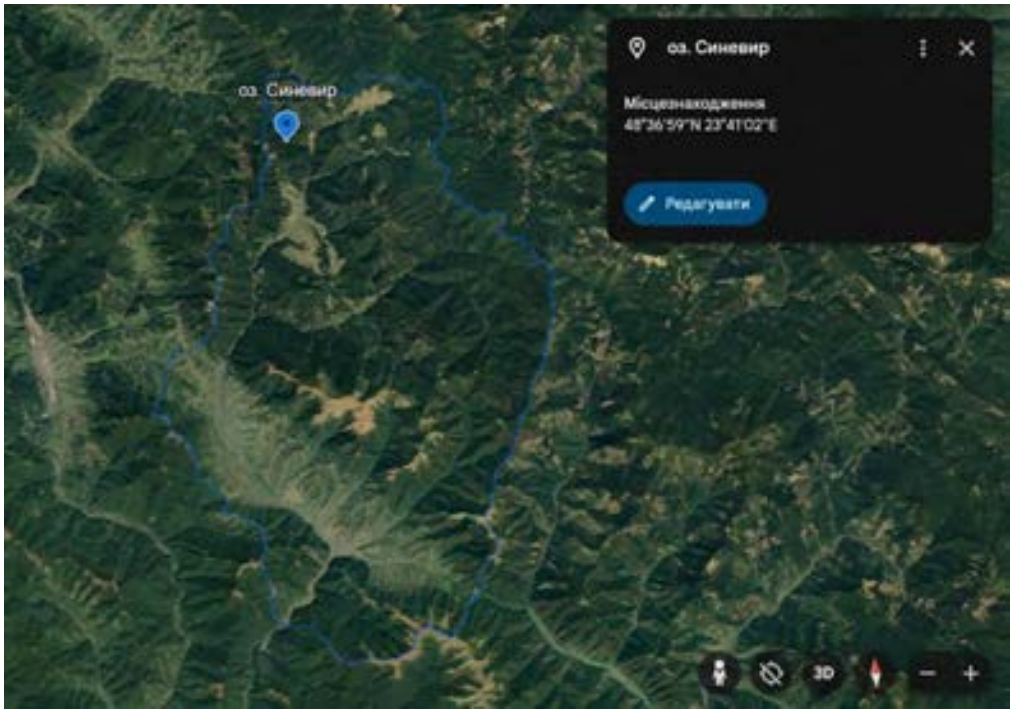


Рис. 1. Розташування озера Синевир на території Національного природного парку «Синевир» [23] /
Fig. 1. Location of Lake Synevyr in the Synevyr National Nature Park [23]

режної території водно-болотного угіддя було виконано у вересні 2023 року із використанням мультикоптера DJI Matrice 300 RTK set, оснащеного лідаром DJI L1 (рис. 2). Лідар DJI L1 забезпечив ширину смуги сканування 100 м із перекриттям сканування 40 % та щільністю хмари точок близько 200 точок/м². Цифрове аерознімання виконано камерою RGB DJI L1 із роздільною здатністю 20 Мп, фокусною відстанню 8,8 мм та розміром кадру 5472×3078 пікселів (16:9). Перекриття аерознімання по маршруту становило 90 %, а міжмаршрутне – 50 %. Подальша обробка та опрацювання отриманих даних проводилося у програмному забезпечення Terrasolid у версії UAV: TerraScan+TerraModeler+TerraMatch. На території досліджуваного об'єкта озера Синевир було запроєктовано та реалізовано лідарне знімання загальною площею 16 га на висоті 90 метрів при швидкості 3 м/с з перекриттям 60 %. БПЛА працював в режимі RTK з сантиметровою точністю. Дослідження проводилося в ясну антициклональну погоду та в умовах високої прозорості атмосфери.

Після безпосереднього проведення лідарного знімання озера Синевир та прибережної території наступним кроком був імпорт вихідних даних та їх опрацювання в програмному середовищі LiGeoreference та TERRASOLID. Було проведено налаштування характеристик проєкту (сканера, камери, системи координат тощо), POS опрацювання для отримання даних POS з високою точністю, а також виконано географічну прив'язку хмари точок, класифікацію хмар точок та їх колоризацію. При цьому середня квадратична помилка після обробки хмари точок склала менше 0,015 м. У результаті виконаних інструментальних досліджень було отримано хмару точок, які лягли в основу подальшої розробка цифрової моделі рельєфу та топографічного плану озера Синевир включно з прибережною територією (рис. 3). На основі зальотів БПЛА також проводилося цифрове аерознімання дослідної



Рис. 2. Підготовка до запуску та планування маршрутів зальотів БПЛА для лідарного знімання озера Синевир / Fig. 2. Preparation for launch and planning of UAV flight routes for lidar scanning of Lake Synevyr

території, у результаті якого було одержано 378 знімків високої роздільної здатності.

Подальші дослідження озера Синевир базувались на основі батиметричного знімання озерного ложа із використанням сучасних приладів та програмного забезпечення. Для батиметричних досліджень використовується сучасний гідроакустичний метод, який полягає в ехолотному зондуванні із синхронною GPS-прив'язкою ехолотних профілів. При проведенні батиметричного знімання на озері Синевир використовувався надувний гумовий човен «BARK», що розрахований на чотири людини. На човні був встановлений ехолот/картплоттер виробництва фірми Lowrance HDS 12 Pro Active Imaging HD, модель якого оснащена навігаційним 12-канальним GPS-приймачем. Живлення ехолота здійснювалось компактними 12-вольтовими акумуляторними батареями. Робоча частота випромінювача звукових хвиль ехолота була встановлена 200 кГц і 800 кГц, а точність визначення глибини становила +/- 0,5 %. На борту над датчиком звуку ехолота/картплотера було встановлено GNSS приймач Trimble R8s для визначення точних координат вимірів глибини у режимі RTK від базової станції, розташованої на острові посеред озера (рис. 4).

Частота оновлення сигналу GPS-приймача становила 5 Гц. Накопичення та суміщення даних з GNSS приймача та ехолота/картплотера виконувалось за допомогою програмного комплекса Trimble HYDROpro Navigation. Опрацювання батиметричних даних, представлених набором просторового положення ехолота (GNSS приймач) та промірів глибин (ехолот), виконано у програмному забезпеченні Trimble HYDROpro NavEdit, шляхом суміщення вимірів за позначкою часу. Редагування даних полягало у виявленні та виключенні помилкових вимірів ехолота та шумів по кожному галсу.

Батиметричне знімання озер є невід'ємним елементом картографування та дослідження озер, без якого неможливо якісно визначити й оцінити морфологічні та морфометричні параметри рельєфу озерного ложа, а також особливості геоекологічного стану та процесів функціонування аквального комплексу [20]. У процесі ехолотного батиметричного знімання озера Синевир кожне одержане значення є інформацією про координати точки знімання, глибину, дату і час ехолотного проміру, температуру поверхні води, що зміщенні відносно попередньої точки проміру й іншу допоміжну інформацію. На рис. 5а показано галси промірів ехолотного зондування ложа озера Синевир, рівновіддаленість яких вра-

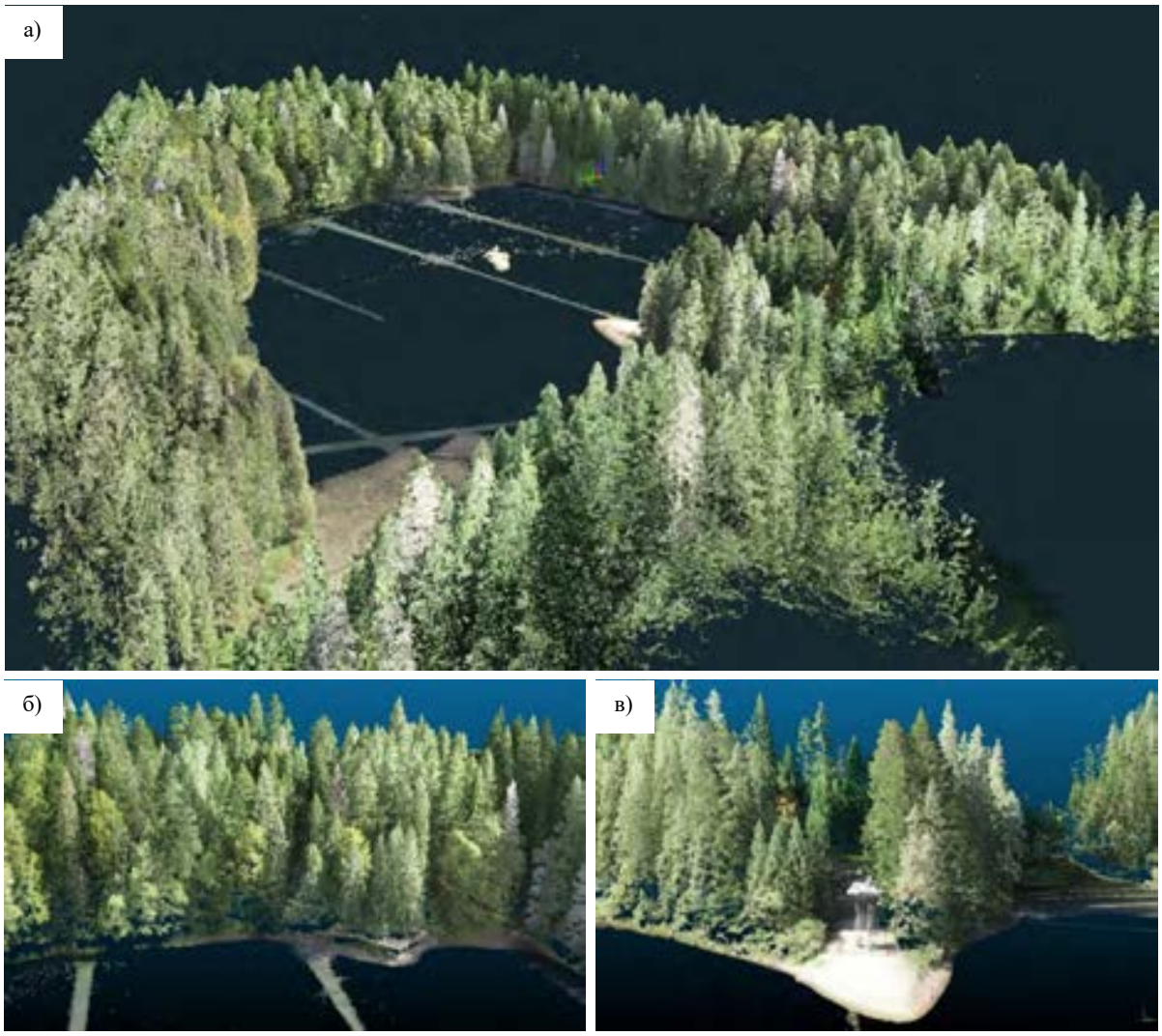


Рис. 3. Опрацювання хмари точок технології знімання LiDAR території озера Синевир: а) загальний план дослідної території; б) північна частина прибережної зони; в) західна частина прибережної зони /
Fig. 3. Processing of the point cloud obtained using LiDAR technology for the territory of Lake Synevyr: a) general plan of the research territory; b) northern part of the coastal zone; c) western part of the coastal zone



Рис. 4. Базова GNSS станція для забезпечення батиметричного знімання ложа озера Синевир /
Fig. 4. Basic GNSS station for bathymetric surveying of Lake Synevyr

ховувала розміщення в центральній частині озера ділянки суші (острова). Використання двох робочих частот ехолота/картплотера 200 кГц та 800 кГц дало змогу отримати комплексну інформацію про морфологію дна досліджуваного озера (рис. 5б, в). Високочастотні сигнали (800 кГц) забезпечили детальне картографування рельєфу дна завдяки високій роздільній здатності, тоді як нижчочастотні сигнали частоти 200 кГц проникали глибше у придонні горизонти озерного ложа. Ця практика є виправданою через значні нагромадження акумулятивних донних відкладів та затоплених уламків дерев, наявність яких підтверджена нашими дослідженнями (рис. 5в).

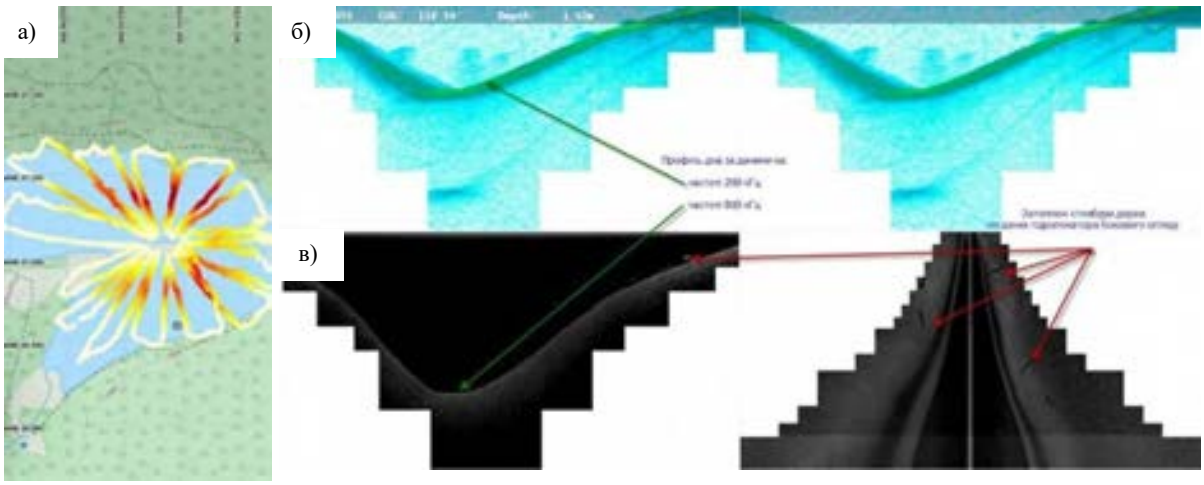


Рис. 5. Результати батиметричного знімання ложа озера Синевир на основі ехолотного зондування: а) галси промірів; б) профілі дна на частоті 200 кГц; в) профілі дна на частоті 800 кГц /
Fig. 5. Results of bathymetric surveying of Lake Synevyr based on echo sounding: a) sounding lines; b) bottom profiles at a frequency of 200 kHz; c) bottom profiles at a frequency of 800 kHz

Виклад основного матеріалу досліджень. Досліджуване нами озеро Синевир та його прибережна територія загалом знаходиться у межах Негровець-Буштульського району Високогірно-полонинської фізико-географічної області [1]. Розчленований рельєф середньогірних ландшафтів та своєрідний механізм утворення озерного ложа в результаті давніх зсувних процесів зумовили формування особливої морфологічної будови території, а картографування та батиметрія озера вимагають застосування сучасних технологій. У результаті опрацювання батиметричних даних отримано відмітки дна озера. А використавши берегову лінію та відмітки дна побудовано TIN модель дна озера Синевир (рис. 6).

У результаті лідарного знімання озера Синевир та прибережної території водно-болотного угіддя за допомогою БПЛА і подальшої обробки хмари точок нами побудовано цифрову модель місцевості (ЦММ) досліджуваної території (рис. 7), яка лягла в основу подальшого аналізу висотної диференціації та картографування рельєфу прибережної до озера території. Вихідними даними для створення ЦММ були результати лідарного сканування Zenmuse L1 на платформі DJI Matrice 300. На першому етапі опрацювання у

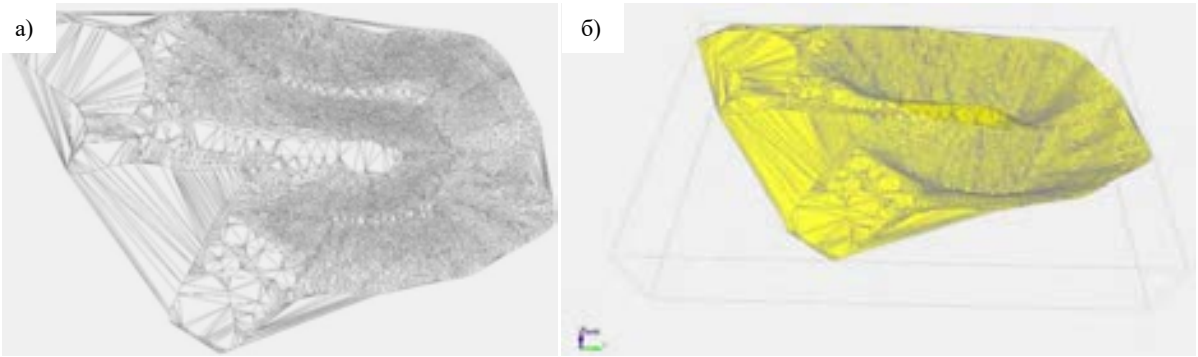


Рис. 6. Візуалізаційна модель ложа озера Синевир, побудована за відмітками дна озера та структурними лініями: а) TIN-модель; б) TIN-модель у 3D /
Fig. 6. Visualization model of the bed of Lake Synevyr, constructed based on lake bottom elevations and structural lines: a) TIN model; b) TIN model in 3D

програмному забезпеченні DJI Terra отримано хмару точок і траєкторії сканування. Другий етап опрацювання виконано у програмному забезпеченні Terra Scan: розділення траєкторії на лінії (Split trajectory), суміщення ліній сканування (Match passes), відокремлення накладань сканування (Cut overlap), згладжування та видалення шуму (Smoothen and remove noise), проріджування точок (Thin points to inactive), класифікування землі (Classify Ground), уточнення моделі за наземними контрольними точками, класифікування рослинності.

У процесі дистанційного зондування озера Синевир також реалізовано цифрове аерознімання у масштабі 1:1 000., в результаті якого отримано 378 знімків. Матеріали цифрового аерознімання Zenmuse L1 опрацьовано у програмному забезпечення Agisoft Metashape. Процес опрацювання включав наступні кроки: обчислення центрів аерознімків (RtkLib), взаємне орієнтування знімків, зовнішнє орієнтування знімків (з визначенням параметрів камери), трансформування знімків з використанням ЦМР лідарного сканування, створення порізів та створення ортофотоплану з роздільною здатністю 5.9 см/пікс (рис. 8). Висока роздільна здатність необхідна для впровадження геоекологічного моніторингу та дослідження акваторії озера, прибережних ділянок та водозбору озера загалом. Розроблений ортофотоплан дозволяє ідентифікувати тип та структуру головно лісової, лучної й водно-болотної рослинності, а також визначити фактичну межу та площу водного дзеркала на момент проведення знімання. Так, за цими даними визначено загальну площу дослідження, що складає 15,4655 г та площу водного дзеркала – 5,9418 га.

Таким чином, поєднання методів дистанційного зондування поверхні за допомогою БПЛА та гідроакустичного батиметричного знімання у програмному середовищі Digitals розроблено топографічний план озера Синевир та прибережної території у масштабі 1:1 000 (рис. 9). Його особливістю є якісне відображення орографічних та морфологічних особливостей озерного ложа та прибережної території озера, що є важливим з точки зору впровадження геоекологічного моніторингу та моделювання коливання рівня води в різних гідрологічних фазах. На топографічному плані горизонталі проведено через 0,5 м, що дозволяє детально проаналізувати морфометричні особливості території, морфологічного генезису утворення озерної улоговини та ін. У результаті батиметричного знімання та геоінформаційної обробки векторних даних при розробці топографічного плану визначено максимальну глибину озера Синевир станом на 29 вересня 2023 р., що становила 19,98 м. Також за даними локатора бокового огляду у процесі батиметрії озерного ложа виявлено затоплені стовбури дерев на дні водойми.

На основі топографічного плану нами розроблено два поперечні перерізи озера Синевир з метою відображення морфологічних рис днища та прибережної території (рис. 10). Вони також будуть використані для подальшого аналізу висотної диференціації морфологічних рис водно-болотного угіддя озера Синевир та розробки ландшафтних профілів на різних експозиціях

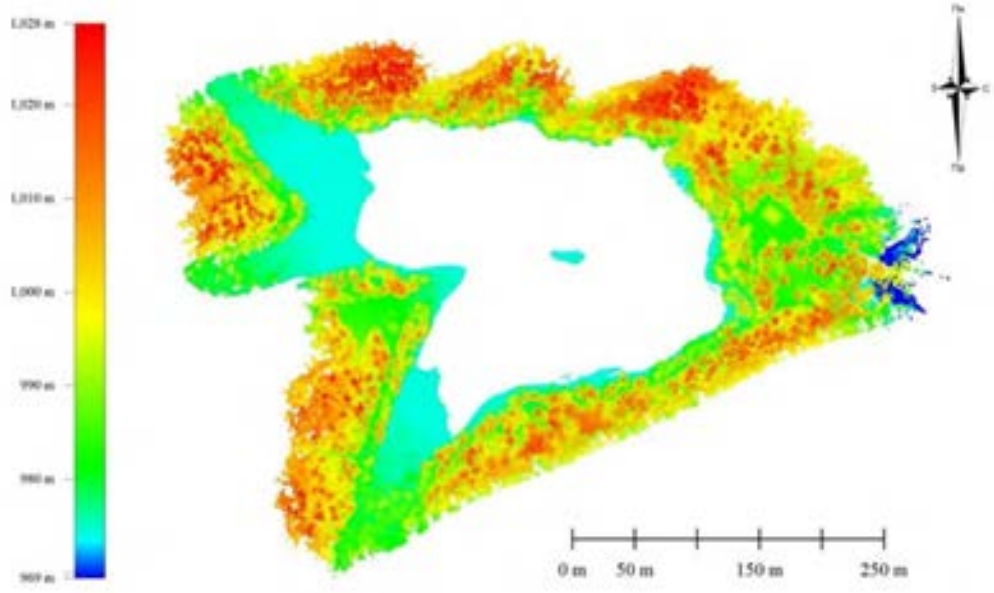


Рис. 7. Цифрова модель місцевості прибережної території озера Синевир (розроблено у програмі Terra Scan на основі опрацювання власних даних дистанційного зондування) /
Fig. 7. Digital model of the coastal area of Lake Synevyr (developed in Terra Scan based on the processing of our own remote sensing data)

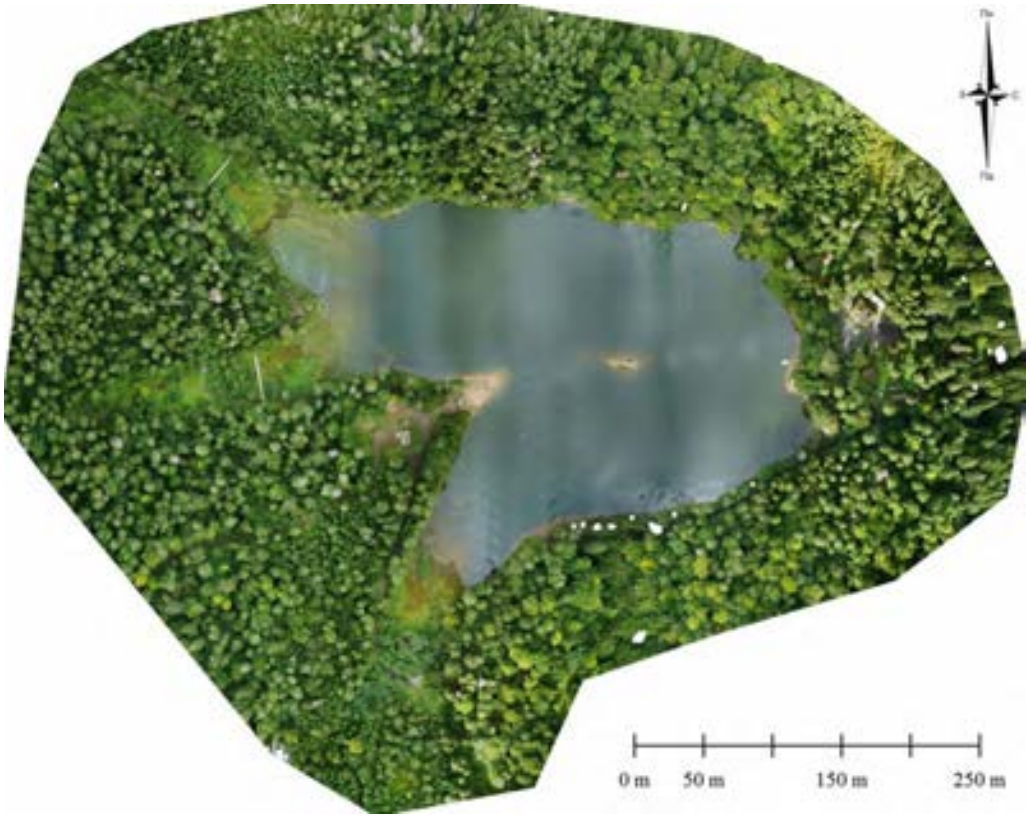


Рис. 8. Ортофотоплан озера Синевир (розроблено на основі власних даних дистанційного зондування) / Fig. 8. Orthophoto map of Lake Synevyr (developed based on our own remote sensing data)

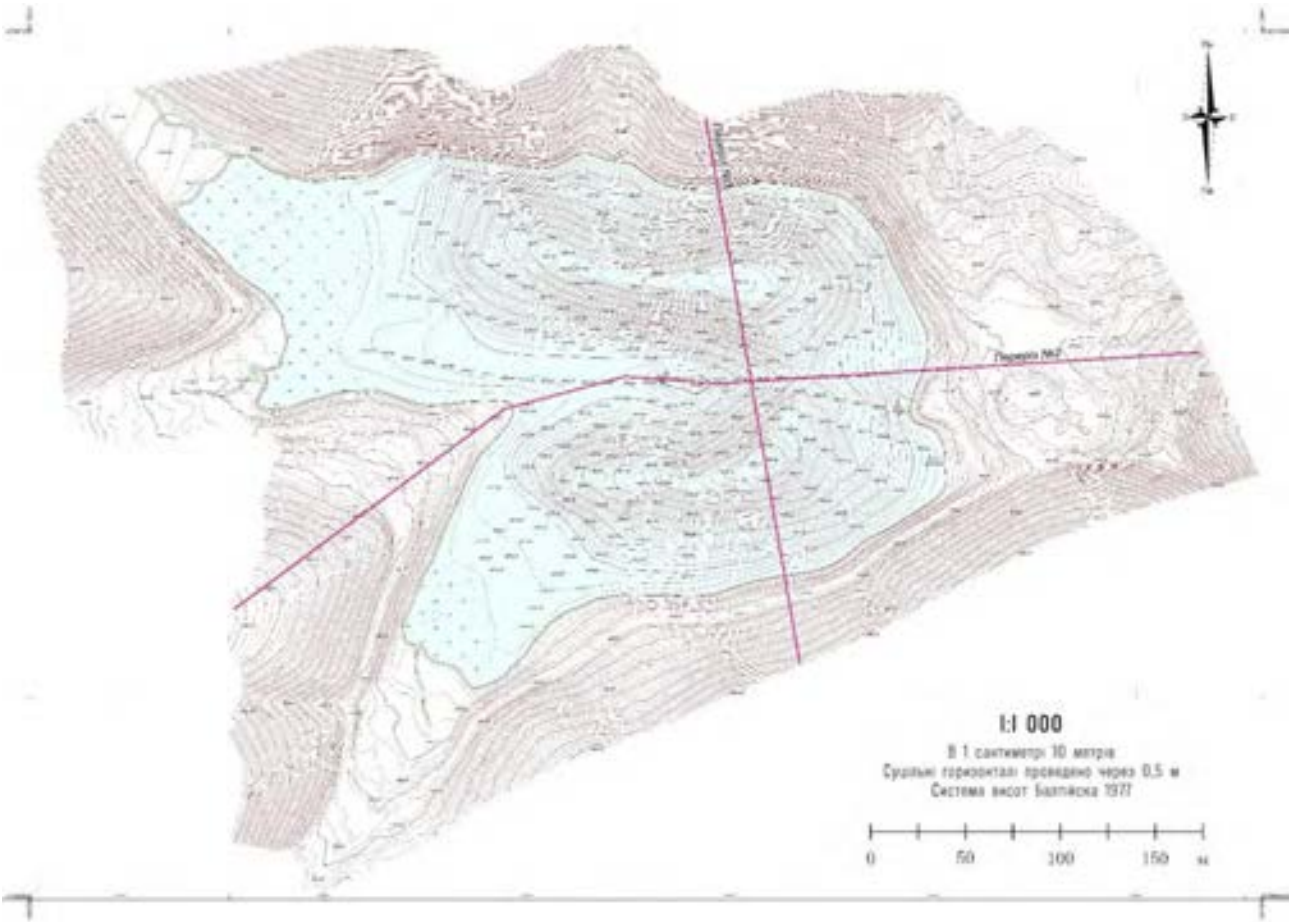


Рис. 9. Топографічний план озера Синевир / Fig. 9. Topographic map of Lake Synevyr

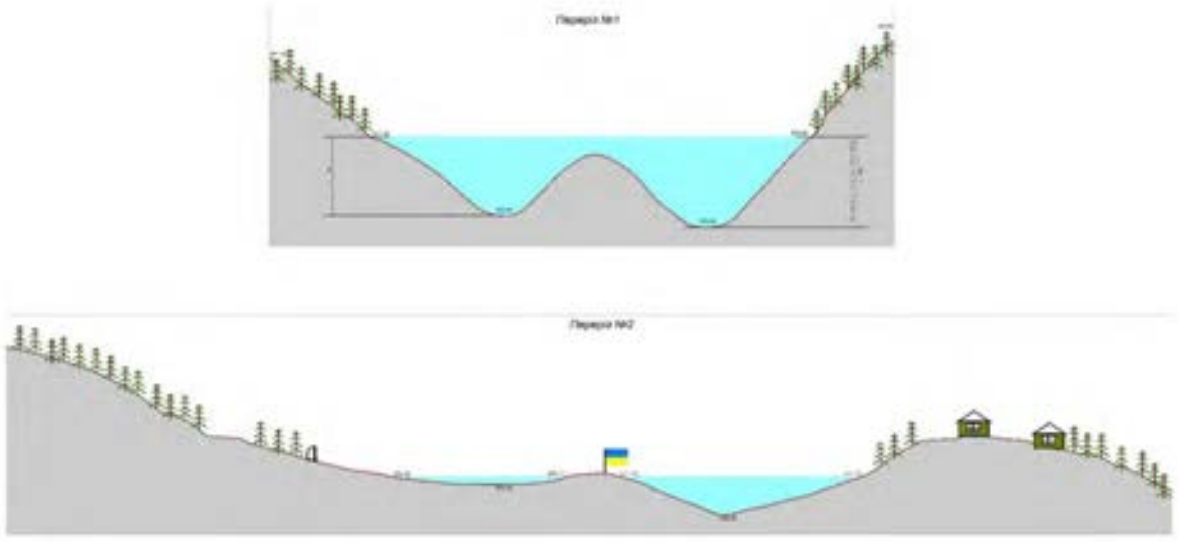


Рис. 10. Гіпсометричні профілі озера Синевир / Fig. 10. Hypsometric profiles of Lake Synevyr

схилів водозбору.

Висновки. У межах проведеного дослідження вперше реалізовано комплексне інструментальне картографування водно-болотного угіддя озера Синевир із застосуванням передових методів дистанційного зондування Землі, у тому числі аерофотознімання з безпілотного літального апарата, лідарного сканування та гідроакустичного батиметричного знімання. Поєднання цих високотехнологічних підходів дало змогу зафіксувати морфологічні особливості озерного ложа та прибережної території, а також розробити високоточні інтегровані картографічні матеріали. На основі даних лідарного знімання вперше для озера Синевир отримано високороздільні ортофотоплани (до 2 см/пікс), а також розроблено цифрову модель місцевості, що деталізує морфологічну будову берегової зони та прилягаючої водно-болотної місцевості. Також вперше серед гірських озер Українських Карпат було виконано гідроакустичне сканування ложа озера Синевир з використанням ехолота SideScan з геоприв'язкою, що забезпечило отримання батиметричних даних із високим рівнем точності (похибка ±0,1 м) та дозволило побудувати відповідну батиметричну модель. Отримані дані лягли в основу створення детального топографічного плану озера Синевир у масштабі 1:1 000 як основного результату нашого дослідження, що цілісно відображає рельєф приозерної території та ложа озера.

Запропонована та апробована на прикладі озера Синевир методика інструментального картографування водно-болотного угіддя, яка базується на поєднанні лідарного знімання, аерофотозйомки з БПЛА та гідроакустичного профілювання, засвідчила свою ефективність. Тому вона може бути успішно масштабованою для застосування на інших водно-болотних угіддях Карпатського регіону. Також завдяки застосуванню геоінформаційних технологій забезпечено інтеграцію багатошарових даних у єдине середовище, що створює підґрунтя для динамічного спостереження за змінами у стані водної екосистеми згідно цілей сталого розвитку ООН. Натомість, розроблені нами картографічні матеріали та отримані геопросторові дані будуть використані для подальших ландшафтно-екологічних та моніторингових досліджень у рамках міжнародного проекту «Впровадження моніторингу водно-болотних угідь міжнародного значення в Карпатському регіоні» (акронім – WeVaRe), що реалізується у рамках міжнародної програми транскордонного співробітництва Interreg VI-A NEXT Hungary-Slovakia-Romania-Ukraine.

Список використаних джерел

1. *Мельник, А. В. (1999). Українські Карпати: еколого-ландшафтознавче дослідження: монографія. Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка.*
2. *Burianyk, O., Karabiniuk, M., Gostiuk, Z., & Terletska, Ya. (2021). Mapping of the forest pathological processes in landscape complexes (on the example of the Rybnyk Maidanskyi river basin in Skole Beskids). International Conference of Young Professionals, GeoTerrace 2021, 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K3007*
3. *Микітчак, Т. І. (2017). Трансформація екосистем льодовикових озер Українських Карпат. Екологія та ноосферологія, 28(3–4), 28–36. https://doi.org/10.15421/031713*
4. *Фельбаба-Клушина, Л. М. (2007). Фітоценотичні та флористичні особливості озера Синевир (Українські Карпати). Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Біологія, 21, 179–181.*

5. *Dudynska, A. T., Romanko, V. O., Dudynsky, T. T., Karabiniuk, M. M., & Zhovnerchuk, O. V. (2023). Species diversity and distribution of synanthropic acarid mites (Acariformes, Acaridia) in Transcarpathia. Zoodiversity, 57(4), 283–292. https://doi.org/10.15407/zoo2023.04.283*
6. *Колесник, О. Б., & Радченко, О. Г. (Ред.). (2019). Національний природний парк «Синевир». Історія та сьогодення. Ужгород: ТДВ «Патент».*
7. *Міллер, Г. П. (1964). Льодовикові озера Чорногори. Вісник Львівського ордена державного університету імені Івана Франка. Серія географічна, 2, 44–52.*
8. *Демедюк, Ю., Колодій, В., & Демедюк, М. (1997). Сучасні донні відклади озер Українських Карпат. Праці Наукового товариства ім. Шевченка, 1, 77–90.*
9. *Микітчак, Т. І. (Ред.). (2014). Екосистеми лентичних водойм Чорногори (Українські Карпати). Львів: ЗУКЦ.*
10. *Гера, Й. Б., & Карпенко, Н. І. (2014). Геоморфологічний аналіз озерних улоговин Свидовецького масиву Українських Карпат. Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат і прилеглих територій, 5, 46–53.*
11. *Антошик, О. (2014). Збереження озер та приозерних територій високогір'я Свидовецького масиву Українських Карпат. Вісник Львівського університету. Серія географічна, (45), 267–275.*
12. *Karabiniuk, M., Saliuk, M., Burianyk, O., Hostiuk, Z., & Lutso, V. (2025). Mapping degradation hotspots of highlands geocomplexes in Chornohora under recreational pressure around Nesamovyte Lake (Ukrainian Carpathians). 18th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Monitoring 2025, 1–5.*
13. *Dong, P., & Chen, Q. (Eds.). (2017). LiDAR Remote Sensing and Applications. CRC Press. https://doi.org/10.4324/9781351233354*
14. *Abdullah, Q. A. (2016). A star is born: The state of new lidar technologies. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 82(5), 307–312.*
15. *Necsoiu, M., Mîndrescu, M., Onaca, A., & Wigginton, S. (2016). Recent morphodynamics of alpine lakes in Southern Carpathian Mountains using high-resolution optical imagery. Quaternary International, 415, 164–174. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.12.032*
16. *Hamilton, S. E., McGehee, D. D., Nyamweya, C., et al. (2022). High-resolution bathymetries and shorelines for the Great Lakes of the White Nile basin. Scientific Data, 9, 642. https://doi.org/10.1038/s41597-022-01742-3*
17. *Martyniuk, V., Korbutiak, V., Hopchak, I., Pryshchepa, A., Zubkovych, I., & Shuliakovska, A. (2022). Landscape and limnology monitoring of reservoirs in Cheremskyi Nature Reserve. 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Monitoring 2022, 2022, 1–6. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580031*
18. *Kirvel, I., Martyniuk, V., Kovalchuk, I., Andronache, I., Korbutiak, V., & Zubkovych, I. A. (2014). Cartographic Landscape Analysis of the Geo-Ecological Condition of the Natural Reserve Object – Lake Doshne (Volyn Polissya, Ukraine). Limnological Review, 24, 385–405. https://doi.org/10.3390/limnolrev24030023*
19. *Kovalchuk, I. P., Martyniuk, V. O., & Šeirienė, V. (2020). The basin-landscape approach to the protection and condition optimization of the lakes of the national parks. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series: Geology. Geography. Ecology, 53, 239–254. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-53-18*
20. *Мартинюк, В. О., Андрійчук, С. В., & Зубкович, І. В. (2020). Досвід батиметричного моделювання та ландшафтного картографування озер поліського регіону України. У U. Kempinska та ін. (Ред.), Scientific developments of Ukraine and EU in the area of natural sciences: Collective monograph (Ч. 2: 495–522). Riga: Izdevnieciba «Baltija Publishing».*
21. *Zubkovych, I., Kovalchuk, I., Martyniuk, V., Korbutiak, V., & Andriychuk, S. (2021). Echo-sounding of lakes of the Nobel national nature park for the purposes of landscape mapping and geoecological monitoring. International Conference of Young Professionals, GeoTerrace 2021, 2021, 1–6. https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K3029*
22. *Демедюк, М. С., Колодій, В. В., & Зденюк, М. В. (1985). Умови утворення та вік Синевирського озера. Доповіді АН УРСР. Серія Б: Геологічні, хімічні та біологічні науки, 11, 8–11.*
23. *Google LLC. (2025). Google Earth [Computer software]. Google. https://earth.google.com*

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу
Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Instrumental Study and Mapping of Lake Synevyr: Remote Sensing Integration for Wetland Geoecological Monitoring

Ivan Kalynych [1]
PhD (Engineering), Associate Professor, Dean of the Faculty of Geography,
[1] Uzhhorod National University, Uzhhorod, Ukraine;
Mykola Karabiniuk [1]
PhD (Geography), Associate Professor,
Department of Physical Geography and Efficient Environmental Management;
Mariia Nychvyd [1]
Associate Professor of the Department of Geodesy, Land Management and Geoinformatics;
Ivan Prodanets [2]
Director
[2] Zakarpattia Regional Branch of the State Enterprise
"Ukrainian State Aerial Geodetic Enterprise";
Oleksii Prymak [3]
Director, [3] Private Enterprise "Geodetic Engineering Agency";
Vasyl Plyska [4]
Head of the GNSS Observation Processing Laboratory,
[4] Control Center of the Ukrainian Permanent GNSS Network

ABSTRACT

Problem Statement and Objective. The study aims to create a high-precision topographic framework for Lake Synevyr, one of the key internationally significant wetlands in the Carpathian region, by integrating remote sensing techniques and hydroacoustic bathymetric surveying. This approach has facilitated the development of a cartographic foundation for the implementation of long-term geoecological monitoring and the assessment of spatiotemporal changes in the lake system under increasing anthropogenic pressure and climate change.

Methodology. The instrumental survey was conducted through a comprehensive mapping campaign using an unmanned aerial vehicle (UAV) equipped with a LiDAR system, photogrammetric processing of high-resolution digital imagery, and echosounding of the lakebed with GNSS referencing. The collected data were processed in specialized software environments (Terrasolid, Agisoft Metashape, Trimble HYDROpro, Digitals), enabling the generation of a digital terrain model, orthophotomap, TIN bathymetric model, and topographic plan.

Study results. For the first time, a comprehensive high-accuracy instrumental mapping of Lake Synevyr has been carried out, including several key components: construction of a digital terrain model of the coastal area, creation of an orthophotomap with a ground sampling distance of 5.9 cm/pixel, and execution of bathymetric profiling with depth data obtained at an accuracy of ±0,1 m. As a result, the maximum lake depth of 19.98 m was recorded, a 3D model of the lakebed was constructed, and hypsometric profiles were developed. The acquired remote sensing and field survey data formed the basis of a high-quality 1:1 000 scale topographic map, which constitutes the core outcome of the study.

Scientific novelty and practical significance. For the first time, a complex instrumental mapping of the mountainous Lake Synevyr has been implemented using an integrated approach combining LiDAR scanning, UAV-based aerial photography, and hydroacoustic bathymetric surveying with high-precision georeferencing. This enabled the acquisition of fundamentally new spatial information on the morphology of the lakebed and the creation of a multicomponent geospatial data system and high-quality cartographic materials. The developed topographic plan and digital datasets provide a robust basis for further spatial analysis of natural changes and serve as a cartographic foundation for implementing long-term geoecological monitoring of Lake Synevyr. The data and cartographic products obtained enable highly accurate hydromorphological, landscape-ecological, and other scientific investigations, as well as the identification and monitoring of the dynamics of natural and anthropogenic processes. The proposed instrumental mapping methodology can be adapted for other sites in the Carpathian region, including within the framework of cross-border conservation initiatives and the systematic management of territories with special ecological status.

Keywords: *Lake Synevyr, Ukrainian Carpathians, wetland, bathymetry, remote sensing, topographic survey, geoecological monitoring.*

References

1. *Melnyk, A. V. (1999). Ukrainian Carpathians: ecological and landscape research: monograph. Lviv: Publishing Center of Ivan Franko National University of Lviv [in Ukrainian].*
2. *Burianyk, O., Karabiniuk, M., Gostiuk, Z., & Terletska, Ya. (2021). Mapping of the forest pathological processes in landscape complexes (on the example of the Rybnyk Maidanskyi river basin in Skole Beskids). International Conference of Young Professionals, GeoTerrace 2021, 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K3007*
3. *Mykitchak, T. I. (2017). Transformation of the ecosystems of glacial lakes in the Ukrainian Carpathians. Ecology and Noospherology, 28(3–4), 28–36. https://doi.org/10.15421/031713 [in Ukrainian].*
4. *Felbaba-Klushyna, L. M. (2007). Phytocoenotic and floristic features of Lake Synevyr (Ukrainian Carpathians). Scientific Bulletin of Uzhhorod University. Series Biology, 21, 179–181 [in Ukrainian].*

5. *Dudynska, A. T., Romanko, V. O., Dudynsky, T. T., Karabiniuk, M. M., & Zhovnerchuk, O. V. (2023). Species diversity and distribution of synanthropic acarid mites (Acariformes, Acaridia) in Transcarpathia. Zoodiversity, 57(4), 283–292. https://doi.org/10.15407/zoo2023.04.283*
6. *Kolesnyk, O. B., & Radchenko, O. H. (Eds.). (2019). Synevyr National Nature Park: History and present. Uzhhorod: Patent [in Ukrainian].*
7. *Miller, H. P. (1964). Glacial lakes of Chornohora. Visnyk of the Lviv Ivan Franko State University. Geographical Series, 2, 44–52 [in Ukrainian].*
8. *Demediuk, Yu., Kolodii, V., & Demediuk, M. (1997). Modern bottom sediments of the lakes of the Ukrainian Carpathians. Proceedings of the Shevchenko Scientific Society, 1, 77–90 [in Ukrainian].*
9. *Mykitchak, T. I. (Ed.). (2014). Ecosystems of lentic water bodies of Chornohora (Ukrainian Carpathians). Lviv: ZUKTS [in Ukrainian].*
10. *Hera, Y. B., & Karpenko, N. I. (2014). Geomorphological analysis of the lake basins of the Svydivets massif of the Ukrainian Carpathians. Problems of Geomorphology and Paleogeography of the Ukrainian Carpathians and Adjacent Territories, 5, 46–53 [in Ukrainian].*
11. *Antoshyk, O. (2014). Preservation of lakes and lake-adjacent areas in the highlands of the Svydivets massif of the Ukrainian Carpathians. Visnyk of the Lviv University. Geographical Series, (45), 267–275 [in Ukrainian].*
12. *Karabiniuk, M., Saliuk, M., Burianyk, O., Hostiuk, Z., & Lutso, V. (2025). Mapping degradation hotspots of highlands geocomplexes in Chornohora under recreational pressure around Nesamovyte Lake (Ukrainian Carpathians). 18th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Monitoring 2025, 1–5.*
13. *Dong, P., & Chen, Q. (Eds.). (2017). LiDAR Remote Sensing and Applications. CRC Press. https://doi.org/10.4324/9781351233354*
14. *Abdullah, Q. A. (2016). A star is born: The state of new lidar technologies. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 82(5), 307–312.*
15. *Necsoiu, M., Mîndrescu, M., Onaca, A., & Wigginton, S. (2016). Recent morphodynamics of alpine lakes in Southern Carpathian Mountains using high-resolution optical imagery. Quaternary International, 415, 164–174. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.12.032*
16. *Hamilton, S. E., McGehee, D. D., Nyamweya, C., et al. (2022). High-resolution bathymetries and shorelines for the Great Lakes of the White Nile basin. Scientific Data, 9, 642. https://doi.org/10.1038/s41597-022-01742-3*
17. *Martyniuk, V., Korbutiak, V., Hopchak, I., Pryshchepa, A., Zubkovych, I., & Shuliakovska, A. (2022). Landscape and limnology monitoring of reservoirs in Cheremskyi Nature Reserve. 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Monitoring 2022, 2022, 1–6. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580031*
18. *Kirvel, I., Martyniuk, V., Kovalchuk, I., Andronache, I., Korbutiak, V., & Zubkovych, I. A. (2014). Cartographic Landscape Analysis of the Geo-Ecological Condition of the Natural Reserve Object – Lake Doshne (Volyn Polissya, Ukraine). Limnological Review, 24, 385–405. https://doi.org/10.3390/limnolrev24030023*
19. *Kovalchuk, I. P., Martyniuk, V. O., & Šeirienė, V. (2020). The basin-landscape approach to the protection and condition optimization of the lakes of the national parks. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series: Geology. Geography. Ecology, 53, 239–254. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-53-18*
20. *Martyniuk, V. O., Andriichuk, S. V., & Zubkovych, I. V. (2020). Experience of bathymetric modeling and landscape mapping of lakes in the Polissia region of Ukraine. In U. Kempinska et al. (Eds.), Scientific developments of Ukraine and EU in the area of natural sciences: Collective monograph (Part 2: 495–522). Riga: Baltija Publishing [in Ukrainian].*
21. *Zubkovych, I., Kovalchuk, I., Martyniuk, V., Korbutiak, V., & Andriychuk, S. (2021). Echo-sounding of lakes of the Nobel national nature park for the purposes of landscape mapping and geoecological monitoring. International Conference of Young Professionals, GeoTerrace 2021, 2021, 1–6. https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K3029*
22. *Demediuk, M. S., Kolodii, V. V., & Zdeniuk, M. V. (1985). Formation conditions and age of Lake Synevyr. Reports of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. Series B: Geological, Chemical and Biological Sciences, 11, 8–11 [in Ukrainian].*
23. *Google LLC. (2025). Google Earth [Computer software]. Google. https://earth.google.com*

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 9 August 2025
Accepted 5 October 2025

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-18
UDC 551.6:528.8:004.8:37
Received 1 September 2025
Accepted 23 October 2025

Restoration as recovery: participatory urbogeosystemic pedagogy of Karazin University for the Erasmus+ project *FutureLand*

Sergiy Kostrikov [1]
DSc (Geography), Professor, K. Niemets Department of Human Geography and Regional Studies,
[1] V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: sergiy.kostrikov@karazin.ua, https://orcid.org/0000-0002-4236-8474;
Liudmyla Niemets [1]
DSc (Geography), Professor, K. Niemets Department of Human Geography and Regional Studies,
e-mail: ludmila.niemets@karazin.ua, https://orcid.org/0000-0001-9943-384X

ABSTRACT

Introduction and previous works done. The 2024 European Nature Restoration Law (NRL) introduces binding restoration targets that – for the first time – explicitly include urban habitats. It challenges higher education to prepare practitioners who can bridge technical diagnostics and community priorities. The *FutureLand* Erasmus+ project answers that call through MOOCs, micro-credentials and participatory Learning Labs. Within *FutureLand* the authors propose a participatory restoration pedagogy tailored to post-war urban recovery, building on prior urbogeosystemic research with urban remote sensing and open geospatial toolkits. Thus, the main **research objective** of this paper is to introduce a transferable, trauma-informed participatory pedagogy.

Exposition of the main research materials. KKNU's pedagogy rests on a dual representation of the city within the frameworks of the urbogeosystemic approach. The conceptual framework demonstrates how the urbanistic environment (UE), urbogeosystem (UGS), and urban ecological system (UES) are structurally connected: raster diagnostics, vector governance, and socio-ecological processes converge into a coherent model. All three constituents enable restoration pedagogy to translate spatial evidence into socially legitimate and ecologically grounded urban futures. Together, UE and UGS translate pixel- and point-cloud signals into place-based narratives usable by municipalities. Methodologically, we follow an "Open-Data-First" principle: OpenStreetMap, global DEMs and available municipal LiDAR are combined with pragmatic 2.5D typological heuristics to produce LOD1/1.5 proxies and conditional volume estimates. Multi-method change detection (vector footprint differencing, hybrid volumetric proxies, and airborne LiDAR comparison) generates candidate urban changes that are then verified in participatory annotation workshops. Lightweight, explainable artificial neural networks, trained on community-annotated datasets and interpreted with Grad-CAM and SHAP, support urban pattern recognition, while keeping model decisions transparent and trustworthy. Pedagogically, the Learning Lab – with trauma-informed facilitation, participatory mapping, memory walks and mixed technical–social assignments – yields evidence packages that balance scientific rigor, civic legitimacy and NRL reporting needs. In these labs students, municipal officers, NGOs and residents co-collect, annotate and validate spatial and narrative data. Pilots in Kharkiv show that student–community teams can produce usable restoration scenarios, data-stewardship templates, syllabi, teacher-training modules and containerized software stacks that lower technical barriers for partners.

Conclusion. Our model shows how universities can catalyze ecological recovery and social renewal in urban areas by pairing open, reproducible technical workflows with trauma-aware, community-centered pedagogy. By aligning urbogeosystemic reasoning universities can serve as convenors and translators – producing governance-ready, community-endorsed evidence even in resource-constrained, post-war settings. Our approach is intentionally pragmatic and scalable: open data, modular lab units and clear documentation enable transfer to other cities lacking LiDAR or extensive municipal data. The pedagogical model helps bridge a gap between spatial science and equitable restoration practice, that gap the NRL now requires us to close.

Keywords*: European Nature Restoration law, participatory pedagogy, urbogeosystemic approach, urban ecological system, learning labs, urban remote sensing, LiDAR, ANN.*

In cites: Kostrikov Sergiy, Niemets Liudmyla (2025). Restoration as recovery: participatory urbogeosystemic pedagogy of Karazin University for the Erasmus+ project *FutureLand*. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 234-255. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-18

Introduction and previous works done

The adoption of *the European Nature Restoration Law (NRL)* in 2024 marked a watershed moment in European environmental governance [17]. For the first time, binding obligations require member states to restore degraded ecosystems across terrestrial, marine, and urban domains, with explicit targets of restoring at least 20% of European Union (EU) land and sea by 2030 and all ecosystems in need by 2050 [17, 18]. This legislation reflects a growing recognition that ecological degradation is not confined to rural landscapes or wilderness areas but is equally acute in cities, where biodiversity loss, climate vulnerability, and social inequities intersect [28, 36, 38, 57]. Urban habitats and green infrastructures are now explicitly recognized as restoration priorities, demanding new forms of evidence, governance, and education.

The European Nature Restoration Law (NRL), enacted in 2024, converts high-level conservation ambitions into binding obligations. It requires member states to restore large swathes of degraded land and sea, and for the first time explicitly includes urban habitats and green infrastructure as restoration targets [49, 50]. Cities are thus squarely in the NRL's sights: biodiversity, climate resilience, and

© Kostrikov Sergiy, Niemets Liudmyla, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

social equity in urban areas now demand the same careful, spatially explicit attention historically reserved for rural or wild landscapes [3, 9, 18].

This legal shift raises two interconnected challenges. First, municipalities need governance-ready evidence: spatial indicators and maps that are robust, transparent, and tailored to reporting. Second, restoration must be socially legitimate. It means developed in ways that reflect local histories, rights, and interests. Meeting both demands requires graduates who are technically fluent (remote sensing, GIS, modelling) and socially literate (participatory facilitation, ethical reflexivity, policy communication).

The *FutureLand* Erasmus+ project responds to these needs by embedding NRL principles into higher education through MOOCs (massive open online courses), micro-credentials, and participatory *Learning Labs* [21]. Within the consortium, the scientific team of the K. Niemets Department of Human Geography and Regional Studies at V. N. Karazin Kharkiv National University (hereafter either "KKNU", or "the KKNU team") offers a distinctive contribution: a pedagogy calibrated to post-war urban recovery, where socio-ecological repair is inseparable from humanitarian recovery, contested memory, and social justice.

Thus, the ultimate **research objective** of this paper is to develop and introduce the concept of a transferable, trauma-informed participatory restoration pedagogy that equips students, graduates, and scientists to co-design, document, and implement community-legitimate, governance-ready restoration proposals for post-war urban contexts aligned with the EU Nature Restoration Law.

KKNU's approach rests on two complementary ideas. Conceptually, the city is treated as a *coupled urbogeosystem* [28, 29]. One lens – *the Urbanistic Environment (UE)* – captures continuous surface dynamics (vegetation indices, impervious surfaces, thermal gradients). The other – *the Urbogeosystem (UGS)* – models discrete objects (buildings, parks, parcels) and attaches governance, ownership, and social attributes. This duality bridges spectral signals and municipal decision-making: pixel changes become place-based narratives that planners and citizens can act on. At last, *the Urban Ecological system (UES)* unites these two issues in cities together.

Methodologically, KKNU favors *an open-data-first stance*. Many municipalities lack the budget for routine LiDAR surveys; therefore, the pedagogy builds on *OpenStreetMap*, *Sentinel/Landsat imagery*, *global DEMs*, and local open data. Where vertical information is missing, typological heuristics produce transparent 2.5D proxies with documented uncertainty. This pragmatic stance preserves reproducibility and lowers technical barriers for students and partner cities.

Pedagogically, the heart of the model is the *Learning Lab* – a space where students, municipal officers, NGOs, and residents co-produce evidence. Activities may include participatory mapping (PGIS, P3DM), memory walks, oral histories, image annotation workshops, and lightweight machine learning experiments. All these methods and techniques were already developed up to fifteen years earlier [15, 16]. Crucially, the labs are trauma-informed: facilitation practices prioritize safety, informed consent, psychosocial referral pathways, and benefit-sharing so that participation is empowering rather than extractive [26].

Pilots in Kharkiv (pilot components of a larger piloting project) will show this model in action: student–community teams generated verified change maps and restoration scenarios that local authorities found usable for early planning. These pilots will suggest that universities can be more than research centers: they can act as conveners, translators, and capacity builders – producing evidence packages that are scientifically robust and socially endorsed.

The remainder of our paper unpacks this contribution: first by situating the model in the literature on restoration pedagogy and human geography, then by detailing policy alignment with the NRL, the open-data, urban remote sensing, and ANN (artificial neural networks) workflows, the Kharkiv pilots, and finally the lessons for scaling and policy translation. All these mentioned constituents have been based on the official documents issued previously, research completed, and academic works done besides those we already referred to above [1-4, 6, 9, 10, 12, 17, 18, 20, 26, 34, 37, 41, 51, 61, 63, 66, 67].

The idea that ecological restoration can serve as both an object and a medium of learning has gained traction in recent decades. Ballard and Belsky [2] argue that *participatory action research (PAR)* in ecological contexts not only generates data, but also builds civic capacity and resilience. Restoration as pedagogy thus positions students and community members as coresearchers who coproduce knowledge, prototype interventions, and reflect critically on values and power relations. This aligns with traditions of service-learning and critical pedagogy, which emphasize reciprocity, civic engagement, and the cultivation of ethical reflexivity [12, 63].

In the context of the Nature Restoration Law (NRL), this pedagogical stance is particularly relevant. The NRL requires outputs that are not only technically robust but also socially legitimate and governance-ready [17, 18]. Restoration pedagogy must therefore train graduates to produce evidence that municipalities can adopt while ensuring that interventions resonate with community values [14, 45].

Exposition of the main research material.

Key theoretical and practical basics. *Human*

geography, contested place, and post-war landscapes. Restoration can be both a subject of study and an educational method: PAR and service-learning traditions show that hands-on restoration builds civic skills and social capital while producing usable knowledge. Under the NRL, restoration education must therefore produce both technically sound outputs and socially legitimate processes.

Human geography teaches that places are socially produced and layered with memory, power, and identity. In post-war cities, parks and brownfields are often both ecological assets and memorial sites. Restoration projects that ignore cultural meaning risk rejection; pedagogy must teach how to surface narratives, map stakeholders, and design interventions that respect contested histories.

Working in post-war settings requires trauma-aware facilitation: prioritize safety, trust, choice, collaboration, and empowerment. In practice, this means flexible participation, trigger warnings, referral pathways, anonymization, and benefit-sharing. Embedding these practices protects participants and strengthens the legitimacy of the research. Restoration education benefits from methodological pluralism: qualitative tools (interviews, oral histories, transect walks, photovoice) reveal values and memories, while geospatial tools (PGIS, OBIA – traditional pixel-based methods, Urban Remote Sensing - URS) provide visual evidence and scenario affordances. The pedagogical aim is to use GIS/URS tools not as an authoritative replacement for local knowledge, but as a transparent, accessible complement. The following visual, a diagram, exposes geospatial data pipeline, which can be employed by human geography for the post-war landscapes' evaluation (Fig. 1).

The flowchart depicts a staged pipeline that ingests and synthesizes multiple geospatial data sources into validated spatial indices. Six primary sources – OpenStreetMap (OSM), Sentinel, Landsat, a global DEM, airborne LiDAR, and municipal portals – feed a central preprocessing stage where formats are normalized and raw inputs cleaned. From there the data pass through harmonization, index computation and a final validation step, producing robust, interoperable spatial products ready for analysis and decision-making. This pipeline is intentionally designed to meet the needs of human geography in contested, post-war places: it generates multi-scalar evidence to map shifting land uses, document infrastructure damage, and reveal patterns of informal occupation that matter for claims to space and contested place-making.

Harmonization and index computation yield comparable metrics – for example, built-up change, elevation-based accessibility, and vegetation recovery – that translate lived, local experiences into demonstrable spatial change. Validation anchors those products in trustworthy evidence, which is crucial when maps are used for reparative planning, resettlement decisions, or to substantiate contested claims after war. Practically, each source contributes distinct insight: OSM surfaces community-edited features and emergent informal settlements as well as civic infrastructure updates; Sentinel and Landsat time series enable temporal change detection for vegetation regrowth, burn scars and broad land-cover transitions; a global DEM reveals terrain constraints on movement, flood risk and strategic or defensible locations; airborne LiDAR supplies fine-scale assessments of building damage, footprints and restoration needs; and municipal portals provide cadastral records, planning layers and administrative boundaries needed to adjudicate claims. Together, these elements form a coherent, defensible workflow for spatially grounded post-war analysis.

Machine learning can significantly help detect urban change, but in civic contexts models must be interpretable [7, 13, 24, 32]. Lightweight ANNs trained on community-annotated data, together with explainability tools (GradCAM, SHAP), allow both students and community members to see how models make decisions – building trust and aligning outputs with policy needs [48].

Nonetheless, key gaps remain within the mentioned domain: longitudinal tracking of student and community outcomes, comparative evaluation of mixed-method bundles, and domain adaptation of models to different urban contexts. *FutureLand's* cross-lab exchanges create an opportunity for comparative learning and refinement.

In synthesis, a *participatory, urbogeosystemic pedagogy* may link pixel-level and cloud-based diagnostics with object-level governance narratives, grounds models in community annotation, and embeds trauma-aware facilitation to produce NRL-compatible, socially endorsed evidence [1, 11, 13-16, 20, 25, 26, 44, 45, 47, 63].

Educational implications, the FutureLand Erasmus+ project, and KKNU's strategic role. The NRL's scope creates a profound demand for new professional competencies. Restoration specialists must be able to: translate remote sensing and GIS outputs into governance-ready indicators [4, 22]; facilitate participatory processes that ensure social legitimacy [2, 12]; integrate trauma-informed approaches in post-war or vulnerable contexts [10, 26]; communicate uncertainty transparently, enabling municipalities to make informed decisions under conditions of risk on the base of geospatial pipeline by implementing early algorithmic approaches to building extraction, which are now integrated into OBIA workflows for post-war urban reconstruction, damage assessment, and restoration planning [43, 55].

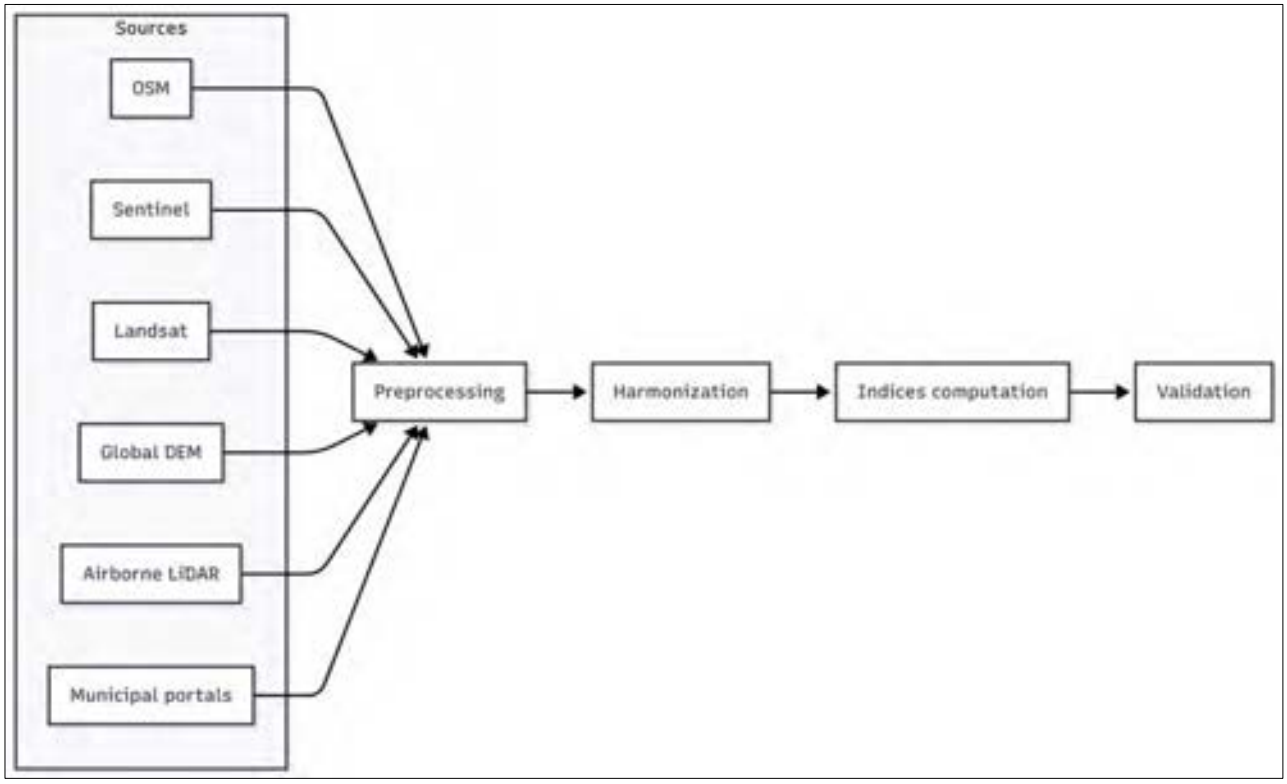


Fig. 1. Geospatial data pipeline for contested, post-war landscapes

Higher education institutions are thus central to the NRL agenda. They must produce graduates who are technically skilled, ethically reflexive, and capable of bridging science, governance, and society [6, 61]. The *FutureLand* consortium has been established to operationalize these educational imperatives. Funded under Erasmus+ KA220HED, it brings together universities, municipalities, and NGOs across Europe to codesign curricula, MOOCs, micro-credentials, and participatory Learning Labs [21]. Its objectives include:

- Embedding NRL principles into higher education curricula (the primary goal);
- Producing open educational resources (OERs) and MOOCs accessible across Europe;
- Piloting participatory Learning Labs that generate NRL-aligned evidence packages;
- Building municipal capacity through training toolkits and policy briefs;
- Facilitating cross-lab exchanges to compare methodologies and outcomes.

FutureLand thus serves as both an educational innovation and a policy instrument, ensuring that the NRL's ambitious targets are supported by a skilled, socially literate workforce.

Within the project consortium, our KKNU's team plays a pivotal role. Its mandate includes:

- Designing participatory *Learning Labs* in post-war urban contexts;
- Developing trauma-informed pedagogical protocols;
- Producing open educational resources (OERs) and MOOCs that integrate human geography, participatory ethics, and open-data GIS workflows.

Piloting this approach in Kharkiv – a city that has suffered extensive urban damage since 2022 – offers both urgency and a real-world testing ground. Kharkiv functions as a living laboratory: its damaged parks, industrial sites, brownfields, residential blocks and public spaces are at once ecological habitats, memorial landscapes, and contested arenas of identity and rights to place. Many of the mapped objects were damaged or destroyed between 2022 and 2025. The first author has previously reported the urbogeosystemic LiDAR-based change detection of hostilities in Kharkiv's most heavily impacted district, *Northern Saltivka* [28, 31]. Below we reproduce an original visual of the consequences of the hostilities – a 2D map highlighting morphological urban changes due to damaged and ruined residential buildings in red (Fig. 2).

Restoration here cannot be reduced to technical repair; it must integrate humanitarian recovery, contested memory, and social justice [20, 44]. KKNU's pedagogy therefore combines urbogeosystemic modeling (*UE/UGS duality* and *UES/UE/UGS triplicity*) with PAR and challenge-based learning (CBL), ensuring that outputs are both technically robust and socially legitimate [2, 12].

Policy translation and dissemination. A distinctive feature of KKNU's role is its emphasis on poli-

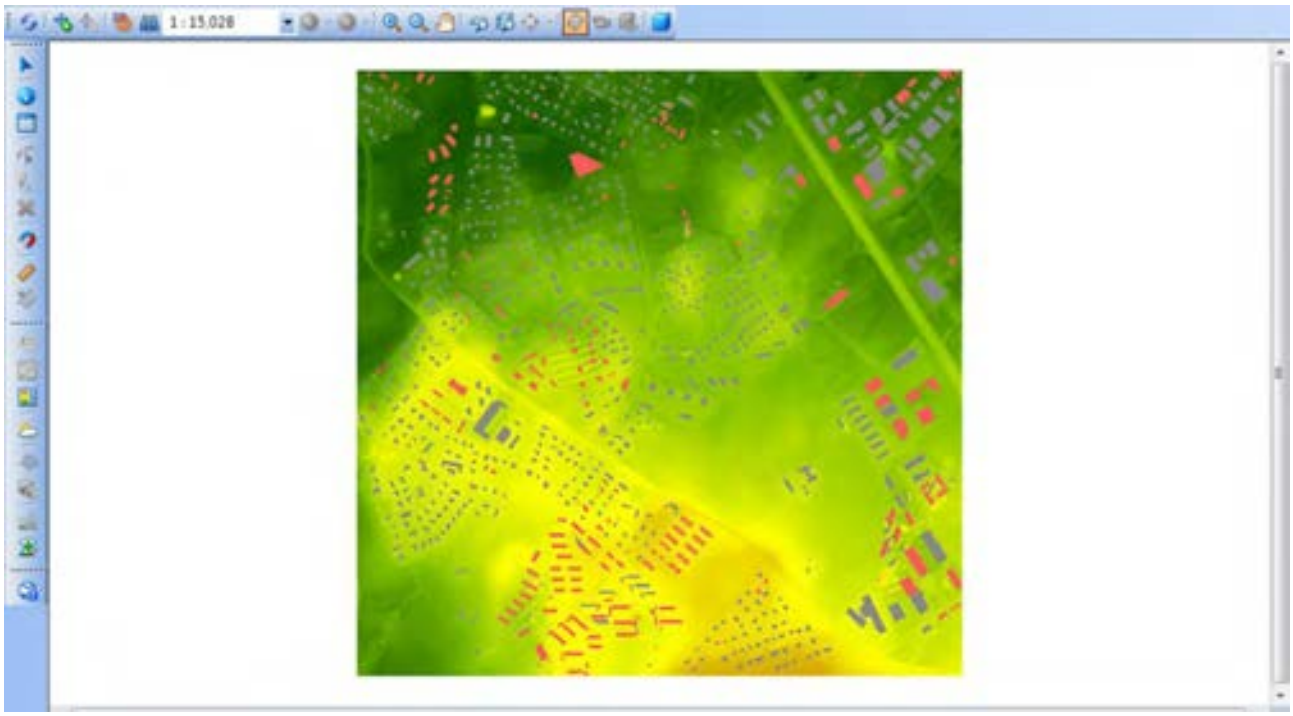


Fig. 2. Change detection results as a *2D map* produced in the *City Change Management* interface (developed by the first author) from the multitemporal LiDAR dataset (2019–2022) for the *Northern Saltivka* district, Kharkiv. Footprints of architectural and structural change are shown in red

cy translation. Outputs from Learning Labs are packaged as NRL-aligned evidence briefs, comprising executive summaries, mapped indicators, uncertainty statements, and implementation roadmaps. Dissemination strategies may include story maps, films, translated briefs, and low-band-width OERs, foregrounding community voices [65, 66]. This ensures that evidence is not only academically rigorous but also accessible to municipal officers, NGOs, and communities.

Risks and opportunities. The policy context also highlights risks. Security constraints may disrupt fieldwork; consultation fatigue may burden communities; expectation mismatches may arise between student proposals and municipal capacities [1]. Moreover, these risks are counterbalanced by opportunities: the chance to embed participatory pedagogy in curricula, to scale OERs across Europe, and to demonstrate that even under post-war conditions, universities can operationalize the NRL.

Conceptual framework: urbogeosystemic thinking and restoration pedagogy. *Restoration as a socio-ecological process.* Restoration in the NRL era is not merely a technical exercise of repairing degraded ecosystems; it is a socioecological process that integrates ecological diagnostics with social legitimacy. Scholars emphasize that ecological interventions succeed only when they are embedded in governance frameworks and community values [2, 20]. In post-war cities, such as Kharkiv, restoration must also address trauma, contested memory, and humanitarian recovery due to existing evaluations of all these issues [37, 44, 62]. The conceptual framework developed by our KKNU's team therefore positions restoration as both ecological repair and social rehabilitation, as well as civic pedagogy, where students, communities, and municipalities coproduce knowledge and interventions.

Urbogeosystemic thinking: UE / UGS duality and UE / UGS /UES triplicity. At the heart of KKNU's model is the urbogeosystemic framework, which conceptualizes the city as a coupled system with three complementary representations already mentioned in this text above:

- Urbanistic Environment (UE): A quasi-raster model capturing continuous surfaces and dynamic flows such as vegetation cover, imperviousness, and thermal gradients. Raster indices like NDVI, NDBI, and SAVI are used to monitor ecological dynamics [46, 69], while LiDAR cloud-based models have been efficiently used to reconstruct massive UE for a whole city scale [35].
- Urbogeosystem (UGS): A quasi-vector model representing discrete urban objects–buildings, parcels, parks, and infrastructures, firstly presented by the authors of this paper [29]. Further developments of the UGS models can be considered along with their semantic attributes such as use, ownership, and institutional links [4, 58], and can be efficiently implemented in the digital city projects [34].

- The urban ecological system (UES) brings these two views together by placing both continuous environmental flows and discrete urban objects within the wider socio-ecological processes that shape resilience, biodiversity, and human well-being. In this structure of triplicity the UE functions as the diagnostic layer, revealing patterns and signals in the urban environment; the UGS provides the governance anchor, linking those signals to institutions, regulations and decision-making; and the UES offers the normative frame, connecting analysis to questions of sustainability, equity and restoration. When the three are aligned, technical indicators gain ecological meaning and social legitimacy, allowing restoration-focused pedagogy to move seamlessly from diagnosis to governance to the civic values that guide collective recovery.

The EE/UGS duality allows translation of pixel/cloud-level signals into object-level narratives (Fig. 3). For example, canopy loss in UE-rasters corresponds to tree removal in a UGS-park polygon; spectral evidence of collapsed roofs translates into building footprint changes with ownership implications. Such translation is essential for producing NRL-aligned indicators that municipalities can act upon [25, 51]. Figure 3 visualizes the urbogeosystemic duality through two interconnected panels. The upper panel (UGS) represents the city as a collection of discrete vector objects–buildings, a church, trees, roads, and land parcels–while the lower panel (UE) depicts the same area as a continuous, quasi-raster surface composed of grid cells that express vegetation, impervious cover, and transitional gradients. A double-headed arrow links the two panels, indicating the bidirectional translation between them: pixel- and point-cloud patterns in the UE correspond to object-level features and meanings in the UGS. For example, a canopy loss detected in the raster domain may translate into the removal of trees within a park polygon, while spectral evidence of roof damage can alter building footprints and update associated ownership records.

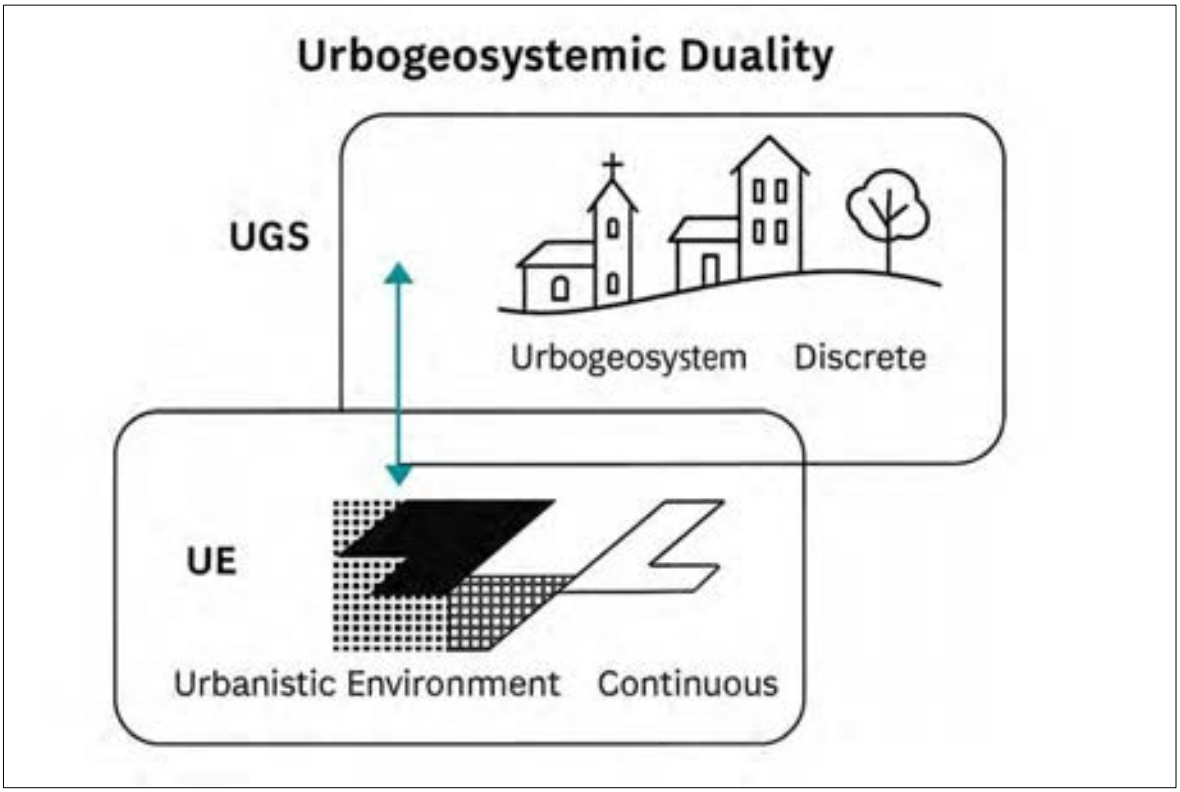


Fig. 3. Urbogeosystemic Duality: linked *Urbanistic Environment (UE)* quasi-raster surfaces and *Urbogeosystem (UGS)* quasi-vector objects, showing how continuous pixel/point-cloud signals translate into discrete object-level narratives (e.g., canopy loss → park polygon tree removal; spectral roof collapse → building footprint change with ownership implications), enabling NRL-aligned indicators for municipal action

Participatory pedagogy and action research. The urbogeosystemic framework is embedded within a participatory pedagogy grounded in PAR and CBL. PAR emphasizes cyclical action-reflection and positions community members as coresearchers [12]. CBL situates learning in real-world challenges, compelling students to negotiate ecological aims with social realities [61]. Together, these traditions argue that restoration education must cultivate technical, governance, and ethical literacies in tandem.

In Kharkiv, this means that students do not merely analyze satellite imageries. Taking into account security regulations due to the war going on, they also conduct memory walks, collect oral histories, and facilitate participatory mapping workshops. These activities surface contested narratives of place and ensure that restoration proposals are socially legitimate [26, 52].

Trauma-informed pedagogy. A distinctive feature of KKNU's framework is its trauma-informed orientation. Postwar contexts require facilitation that prioritizes safety, trust, choice, collaboration, and empowerment [1, 10, 56]. Trauma-informed pedagogy in restoration involves:

- Consent protocols and plain-language data use statements.
- Optional participation modalities for sensitive sessions.
- Referral pathways to psychosocial services.
- Anonymization of sensitive testimonies.
- Ethical audits with community representatives.

By embedding these safeguards, the KKNU's team ensures that Learning Labs avoid extractive tendencies and instead foster resilience and reciprocity. This aligns with broader calls for humanitarian ethics in community-engaged research [20].

Open data first and pragmatic modeling. The framework also incorporates a methodological stance: *open data first*. Many municipalities lack resources for regular airborne LiDAR surveys. The KKNU's team therefore prioritizes freely available datasets such as OSM, Sentinel, Landsat, DEMs, and municipal open LiDAR portals [4, 22, 33-35]. Where height data are missing, typological heuristics estimate building heights based on footprint area and building type, producing pragmatic 2.5D models. These approximations are explicitly presented with uncertainty intervals, ensuring transparency and trust. Such approach reflects a broader pedagogical principle: technology should be supportive, not determinative. Students learn to use GIS and remote sensing as tools that complement, rather than replace, participatory processes [15, 16, 66].

Artificial neural networks as pedagogical tools. Machine learning is integrated into the framework not as an opaque automation but as a pedagogical tool. Lightweight Artificial Neural Networks (ANNs)–such as similarity networks and contrastive Siamese architectures–are introduced to demonstrate pattern recognition and anomaly detection [23, 27, 39, 64]. Training datasets are produced through participatory annotation workshops, grounding models in local realities [2]. Explainability techniques such as *GradCAM* [54] and *SHAP* [42] are used to show how models arrive at decisions, fostering transparency and civic trust.

Integration with the NRL. The conceptual framework is explicitly aligned with the NRL's requirements. The UE / UGS duality, and UE / UGS / UES triplicity both support the production of spatially explicit indicators; participatory pedagogy ensures stakeholder inclusion; trauma-informed facilitation guarantees ethical safeguards; open data workflows enhance reproducibility; and ANN explainability fosters transparency. Together, these elements produce NRL-compatible evidence packages that municipalities can adopt for reporting and planning [5, 17].

Synthesis due to the conceptual framework. In sum, KKNU's conceptual framework integrates urbogeosystemic thinking, participatory pedagogy, trauma-informed facilitation, and open data pragmatism into a coherent model of restoration education. It reframes restoration as a socioecological and educational process, where technical diagnostics are inseparable from community narratives and ethical safeguards. This framework not only addresses the immediate needs of post-war Kharkiv, but also offers a transferable blueprint for other European contexts facing ecological degradation, governance complexity, or social contestation.

Methodology: open data, pragmatic modeling, neural networks, and participatory workflows. *Open dataFirst strategy.* A cornerstone of the KKNU team approach within *FutureLand* is the open data first principle. Many municipalities, particularly in post-war or resource-constrained contexts, lack the financial or logistical capacity to commission regular airborne LiDAR surveys or high-resolution proprietary datasets. Instead, the pedagogy prioritizes freely available and reproducible sources:

- OpenStreetMap (OSM) building footprints and attribute tags, which provide a dynamic, crowdsourced baseline of urban morphology [8, 22];
- Sentinel2 and Landsat imagery, offering multitemporal optical data for vegetation indices (NDVI, SAVI) and built-surface monitoring (NDBI) (40, 69];
- Global DEMs such as SRTM and ALOS, which provide elevation baselines for terrain and conditional volume proxies [59];
- Municipal open data portals with LiDAR point clouds and cadastral archives, local monitoring results, where available, to supplement global datasets with local specificity [29, 30, 33];
- Historical maps and crowdsourced imagery, which allow diachronic comparison and community validation [52].

This strategy not only reduces costs, but also enhances reproducibility and transparency, aligning with open science and open pedagogy principles

[Wiley, Abernathy, 2023]. All preprocessing scripts are stored in version-controlled repositories, ensuring that workflows can be replicated and adapted across *FutureLand* partners.

Preprocessing and harmonization. To ensure comparability, all datasets undergo a reproducible ingestion pipeline:

- Reprojection to a common coordinate reference system.
- Cloud masking and atmospheric correction for optical imagery.
- Band normalization and computation of spectral indices (NDVI, NDBI, SAVI).
- Topology checks and attribute harmonization for vector layers.

This harmonization is critical for producing NRL-aligned indicators that are consistent across time and space [17, 45].

Pragmatic 2.5D modeling. LiDAR point cloud processing is the most efficient technology for urban space reconstruction [53]. Where LiDAR is unavailable, our team employs typological heuristics to estimate building heights. These heuristics draw on footprint area, building type tags, and local typologies (e.g., single-family residential, midrise multifamily). Spot checks using street photos or municipal metadata validate these estimates, and uncertainty bands are explicitly recorded [4, 2015, 35]. We can illustrate pragmatic 2.5D modeling with the following original explanatory visual (Fig. 4):

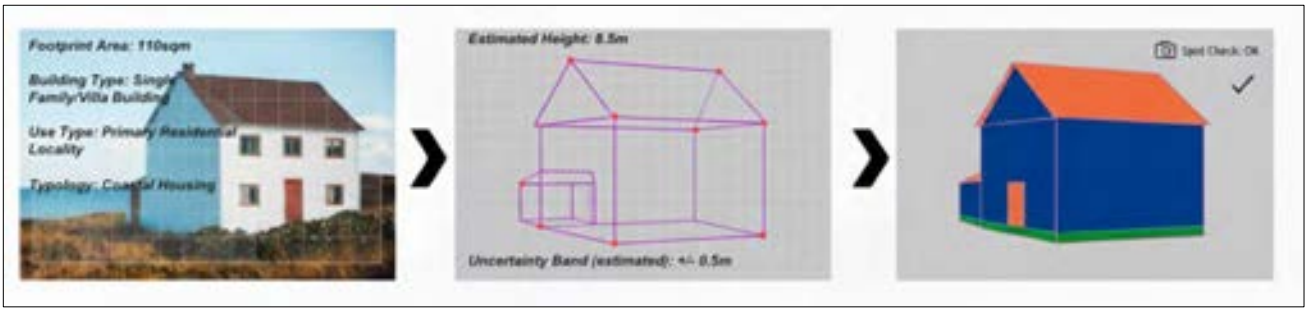


Fig. 4. Pragmatic 2.5D building-modelling workflow: *left* – street photograph with extracted *footprint area (116 m²)* and typological tags; center – *wireframe height estimate (8.5 m)* with explicit *uncertainty band (±0.5 m);* right – shaded 3D rendering with *verification flag (Spot Check OK)*

The figure above illustrates a three-stage 2.5D modeling workflow that complements the typological heuristics outlined earlier. On *the left*, a street-level photograph shows a single-family house alongside its extracted metadata – footprint area (116 m²), building type, use, and local typology. In *the center*, a wireframe 3D model presents the estimated building height (8.5 m) together with an explicitly defined uncertainty range (± 0.5 m). On *the right*, a shaded 3D rendering of the same footprint carries a verification flag *("Spot Check OK"*), confirming that the model has been successfully validated against aerial imagery or municipal records. Together, these panels demonstrate how footprint-based heuristics, quantified uncertainty, and selective spot checks can be integrated to produce practical, reliable 2.5D building representations for urban analysis and planning as well as for educational purposes.

By combining footprint polygons with DEMs and inferred heights as described above, the URS segment of the urbosystemic pedagogy produces operational 2.5D approximations (LOD1/LOD1.5). These are adequate for neighborhood-level conditional volume proxies, which support prioritization of restoration interventions. Importantly, conditional volumes are always presented with uncertainty intervals, ensuring that municipal users understand limitations and can make informed decisions [31, 33, 35, 58].

Multi-method change detection. A robust detection pipeline integrates multiple methods, each with complementary strengths:

- Pixel-based spectral differencing: Temporal deltas of NDVI, NDBI, and other indices flag vegetation loss and impervious surface changes [69];
- Object-Based Image Analysis (OBIA): Segmentation of scenes produces coherent objects that map to OSM footprints, supporting semantic comparisons across epochs [25];
- Vector footprint differencing: Comparing timestamped OSM or cadastral polygons identifies added, removed, or altered footprints [22];
- Hybrid volumetric proxies: Footprint deltas combined with typological height priors yield conditional volume-change estimates, prioritizing structural assessments [53];
- Urban change detection with LiDAR: This *Change Detection* technique provides monitoring of a city's architectural (geometric) changes over a selected period of time. An automated comparison of two LiDAR point clouds, takes into account all three generally

accepted tasks that must be addressed for representative 2.5D/3D change detection: 1) coordinate system alignment; 2) spatial comparison; and 3) detected changes representation and analysis [28, 30, 57, 60].

Each stream from the list above produces candidate changes for human verification and ANN training. This multimethod triangulation enhances robustness and aligns with NRL's demand for credible, transparent evidence [17]. For example, urban change detection based on the LiDAR monitoring results has efficiently reconstructed the hostilities' impact on UE in Kharkiv, which can be depicted either as a *2D map* (Fig. 2), or – even in more representative way – as a *3D scene* in a spatial modeling interface (Fig. 5).

Participatory annotation and labeling. High-quality labeled datasets of the various sensors are essential for ANN training. Our team organizes participatory annotation workshops, where students and community volunteers crosscheck satellite imagery, LiDAR surveys, Google street photos, and local knowledge to label instances as *Added*, *Removed*, *Modified*, or *Unchanged*.

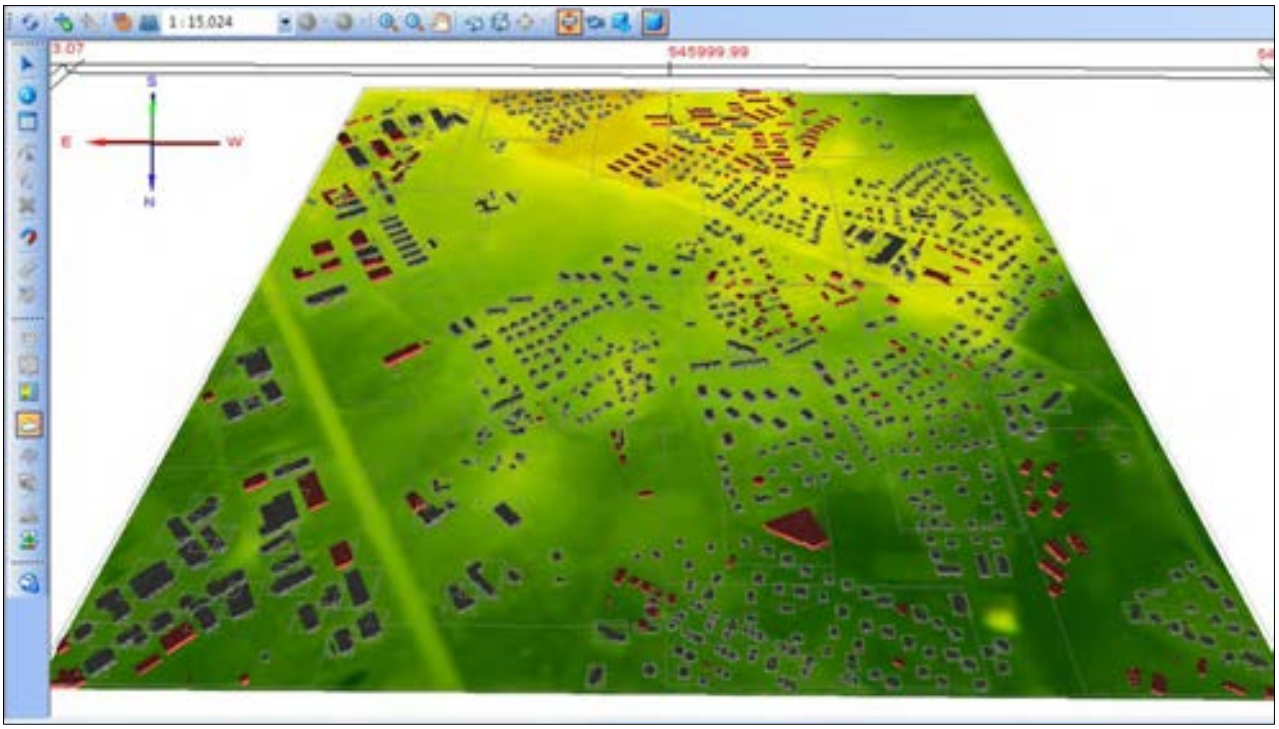


Fig. 5. Change detection results as a *3D scene* produced in the *City Change Management* interface (developed by the first author) from the multitemporal LiDAR dataset (2019–2022) for the *Northern Saltivka* district, Kharkiv. Features of architectural and structural change are shown in red.

We start with freely available, reproducible sources: *OpenStreetMap* footprints, Sentinel-2 and Landsat imagery for multispectral indices (NDVI, NDBI, SAVI), free airborne LiDAR datasets (if available), global DEMs (SRTM/ALOS), municipal open-data, and historical imageries. These inputs enable reproducible preprocessing and lower barriers for partners.

All datasets should be harmonized through a reproducible pipeline: consistent coordinate systems, cloud masking and atmospheric correction for optical data, band normalization, spectral indices, and topology/attribute checks for vectors. Scripts and notebooks are version-controlled so partners can reproduce and adapt workflows.

Where or if LiDAR is absent, typological rules estimate building heights from footprint area and land use tags. Combined with DEMs, these priors yield 2.5D approximations (LOD1 / LOD1.5) and conditional volume proxies. Every estimate includes explicit uncertainty bands and validation spot checks using street photos or municipal metadata.

Urban change is detected with complementary methods:

- Pixel differencing (temporal deltas of NDVI, NDBI) to flag vegetation or surface change;
- OBIA to create coherent segments linked to OSM footprints;
- Vector footprint differencing to detect added/removed/changed buildings;
- Hybrid volumetric proxies combining footprint deltas and typological heights or conditional volume change;
- Where and if LiDAR datasets are available, a relevant pipeline should be implemented, since it already provided a robust output (Fig. 2, 5).

Candidate changes are human-verified and then used to build training samples for machine learning.

Students and community volunteers label imagery in workshops (*Added, Removed, Modified, Unchanged* classes), producing labeled data that is both technically useful and democratically grounded.

Artificial neural networks in urbogeosystemic pedagogy. We use two pedagogical ANN approaches intended to be applied within the Learning Labs activities of the *FutureLand* project (Fig. 6): *Similarity-oriented networks* that fuse image patch CNN embeddings with tabular descriptors to score similarity between paired observations; *Contrastive (Siamese) networks* that separate changed from unchanged pairs in embedding space.

This figure provides a clear schematic of two stacked ANN pipelines that are applied in Learning Labs for *urban change detection* and *restoration analysis*. These two pipelines represent further development of our ANN-methodology reported earlier [32]. The upper visual pipeline (the Enhanced ANN Similarity model) combines visual embeddings derived from a convolutional neural network (CNN) with tabular descriptors processed by a multi-layer perceptron (MLP), resulting in a joint embedding and a similarity score. The lower pipeline (the Contrastive Siamese model) uses shared-weight CNN branches to generate paired embeddings and a distance-based loss function, which ultimately drives a binary decision of *Changed* or *Unchanged*. The model processes both image and tabular inputs. Image data are provided as small pairs of patches – in the upper pipeline, these are labeled as *A/B* and in the lower pipeline as *anchor/compare*. Tabular inputs include attributes like area, volume height (all obtained from LiDAR) NDVI difference, and typology, which are processed through MLPs. Preprocessing involves standard image normalization and tabular scaling, with visual and tabular streams kept separate until they are fused.

In the Enhanced ANN Similarity pipeline, the CNN backbone generates 512-dimensional visual embeddings for each patch, while the tabular MLP produces 64-dimensional embeddings. These are concatenated to form a 256-dimensional joint embedding, which is then processed by a similarity head to produce a 0-1 similarity score. The pipeline ranks patch pairs by similarity, supporting prioritization and near-duplicate detection. It also includes explainability features through Grad-CAM (for vision) and SHAP (for tabular inputs).

The Contrastive Siamese pipeline uses twin CNN branches with shared weights to produce 512-dimensional embeddings for each patch pair. The embeddings are compared using Euclidean or cosine distances, and a contrastive or triplet loss function is used to maximize separation between *changed* and *unchanged* pairs.

The final output is a thresholded binary classification, indicating whether the changes are significant or not. Training for both pipelines involves participatory annotations and curated patch pairs, supervised for both similarity and contrastive objectives. Evaluation metrics include ROC/AUROC, correlation, precision, recall, F1 score, and embedding-margin separation. To ensure interpretability, Grad-CAM visualizations highlight key spatial features, while SHAP values are used to quantify the influence of tabular descriptors.

In the research workflow, the Enhanced Similarity Pipeline is used in Learning Labs to prioritize and rank potential change pairs, while the Contrastive Siamese Pipeline performs final, high-confidence urban change detection. Both pipelines feed results into downstream stages, such as triage, stakeholder review, and urban restoration planning, where rapid, explainable assessments of visual and contextual changes are crucial.

This architecture combines deep learning with interpretable tabular modeling, offering a transparent and data-efficient framework for urban change detection and restoration analysis for cities. It strikes a balance between quantitative accuracy and qualitative insights, aligning computational methods with participatory, human-centered research objectives.

Community members will also participate in annotation workshops, labeling satellite imagery, LiDAR point clouds, and street photos to identify *Added*, *Removed*, *Modified,* or *Unchanged* urban structures. This not only produce robust training data for ANN models but also ground technical outputs in local realities.

Municipal roundtables and policy uptake. Outputs from the Learning Labs were presented in municipal roundtables, where local officials, NGOs, and community representatives reviewed evidence packages. These packages will include:

- Verified change maps of building footprints, change detected features and green cover;
- Neighborhood summaries of lost area, conditional volume proxies, and restoration priorities;
- Draft restoration scenarios aligned with NRL indicators;
- Executive summaries with cost bands and implementation roadmaps.

Municipal officers will emphasize the value of transparent uncertainty statements and community validation, which increased the credibility and uptake of the outputs.

Outcomes and lessons learned. The Kharkiv pilots will produce several key outcomes:

- Technical outputs: Verified change maps, ANN similarity/dissimilarity scores, and NRL-aligned restoration scenarios;
- Pedagogical outcomes: Students gain compe-

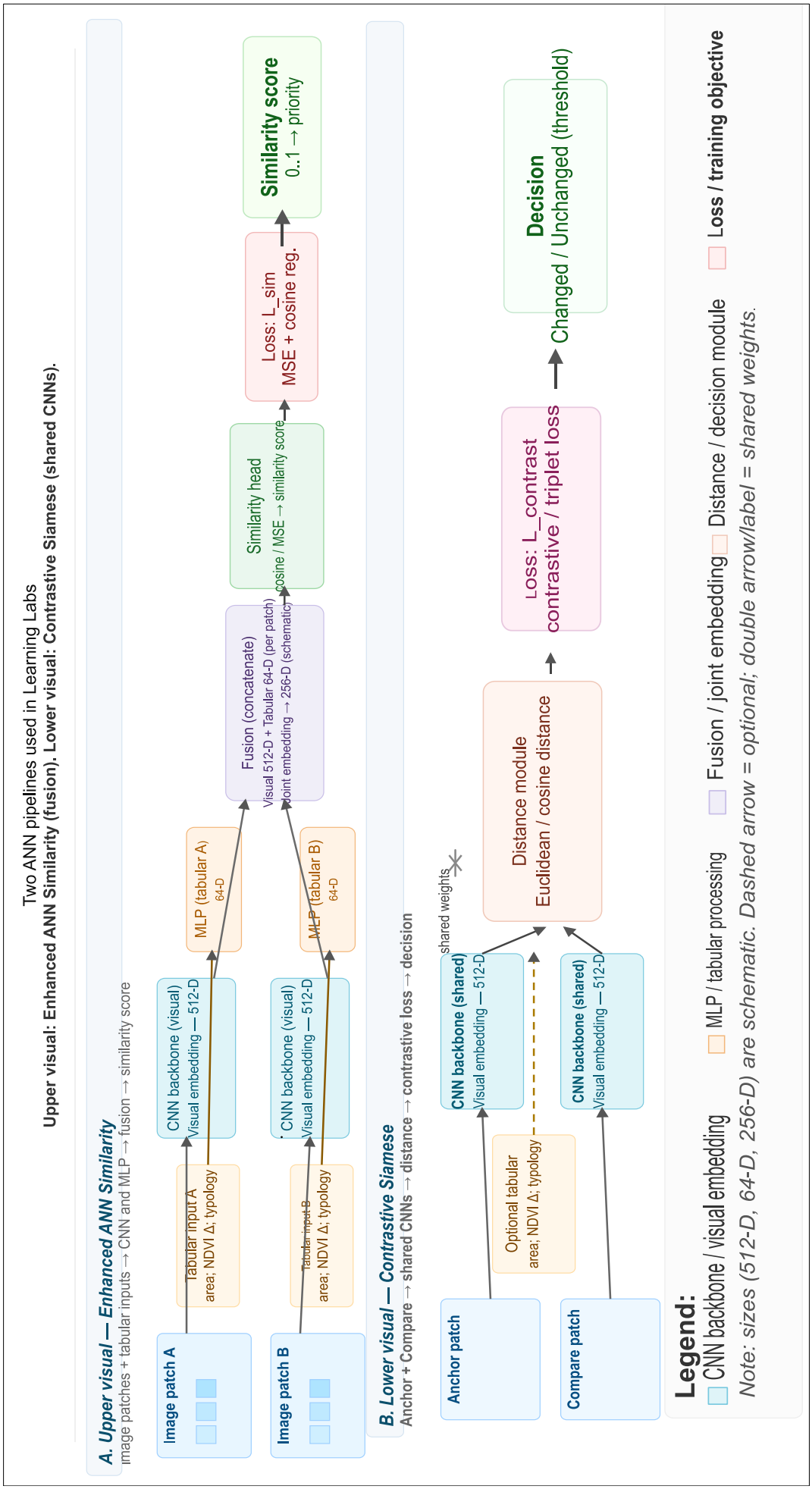


Fig. 6. Two Artificial Neural Networks' pipelines planned to be used in Learning Labs: *Upper visual* – Enhanced ANN Similarity (fusion); *Lower visual* - Contrastive Siamese (shared convolutional neural networks)

tencies in open data workflows, participatory facilitation, and ethical reflexivity.
- Community outcomes: Residents would reengage in shaping their urban futures, and their narratives will be embedded in restoration planning.
- Policy outcomes: Municipal officers will receive actionable, NRL-compatible evidence packages that informed early restoration planning.

Lessons learned include the importance of multimethod triangulation (pixel, object, vector, volumetric), the value of participatory annotation for both technical and civic legitimacy, and the necessity of trauma-informed facilitation in post-war contexts [1, 25, 47].

Scaling and transferability. The Kharkiv pilots also will provide insights for scaling. Crosslab exchanges with Venice, Girona, and Joensuu are planned to compare methodologies and outcomes, addressing evidence gaps in comparative evaluation [14]. Shared repositories of OERs, benchmark datasets, and municipal toolkits will enable replication across Europe [21, 66]. While the model is tuned to postwar urban contexts, its principles–open data pragmatism, urbogeosystemic modeling, participatory pedagogy, and trauma-informed facilitation–are transferable to other European regions facing ecological degradation, governance complexity, or social contestation [20, 61].

Synthesis due to the methodology. The Kharkiv pilots demonstrate that even under conditions of war and resource scarcity, universities can operationalize the NRL through participatory pedagogy. By integrating open data workflows, urbogeosystemic modeling, ANN explainability, and trauma-informed facilitation, the KKNU team will produce outputs that are scientifically credible, socially legitimate, and governance-ready. More importantly, the pilots reengaged communities in shaping their urban futures and trained a new generation of restoration specialists. This dual achievement - technical innovation and civic empowerment - illustrates the transformative potential of the participatory urbogeosystemic pedagogy in the NRL era.

Results and policy translation. *Learning Labs circle and technical outputs.* The schematic in Fig. 7 summarizes *the Learning Lab* as an iterative, evidence-driven cycle that links technical workflows with community-centered decision-making. The pipeline starts with reproducible data curation – assembling and cleaning imagery, LiDAR, OSM, municipal layers and field notes while documenting provenance and uncertainty – and proceeds to lightweight, interpretable ANN models that surface candidate changes for human review. At the heart of the cycle, students, residents and municipal staff jointly inspect, label and correct model candidates; those community-validated labels then refine the models and feed back into new rounds of analysis. Outputs are translated into governance-ready briefs (maps, uncertainty statements and short implementation roadmaps) that municipalities can use directly, and field validation closes the loop by informing sensitivity tests and subsequent annotations.

In Kharkiv, these labs will produce a coherent set of technical products, that demonstrate the feasibility of an open-data, participatory, urbogeosystemic approach. Student teams – working with community members and municipal officers – produce verified change maps that distinguish *Added, Removed, Modified* and *Unchanged* building footprints (combining LiDAR monitoring, OSM updates, Sentinel-2 differencing and participatory annotation); neighborhood summaries quantifying lost area, conditional volume proxies and green-cover change aligned to Nature Restoration Law indicators; restoration scenarios that integrate ecological, social and memorial dimensions; and ANN similarity scores that efficiently prioritize sites for triage (Fig. 7).

Crucially, whether using airborne LiDAR or pragmatic 2.5D approximations from open imagery, the Learning Lab cycle yields policy-ready evidence: reproducible workflows, explicit uncertainty statements, and participatory validation that municipalities can trust in reparative planning.

These outputs demonstrate that either with LiDAR, or even without it, pragmatic 2.5D modeling and participatory validation can produce policy-ready evidence for urban restoration.

Pedagogical and community outcomes. Equally significant are the pedagogical outcomes. Students develop competencies in open data workflows, participatory facilitation, and ethical reflexivity. They learn to communicate uncertainty transparently, a skill critical for NRL reporting. For communities, the pilots provide opportunities to reclaim agency in shaping their urban futures. Memory walks and participatory mapping enabled residents to articulate losses and aspirations, embedding their narratives in restoration planning. This process fosters trust and reinforces the legitimacy of outputs.

Policy translation: evidence packages. To ensure municipal uptake, outputs were packaged as NRL-aligned evidence briefs. Each package included:
- Executive summary with prioritized plots and estimated intervention cost bands;
- Methodology and data provenance appendix, ensuring transparency and reproducibility;
- Mapped indicators with uncertainty statements, covering area lost, conditional volume, and green cover change;
- Validation annex, including photos, community testimony summaries, and annotation records;

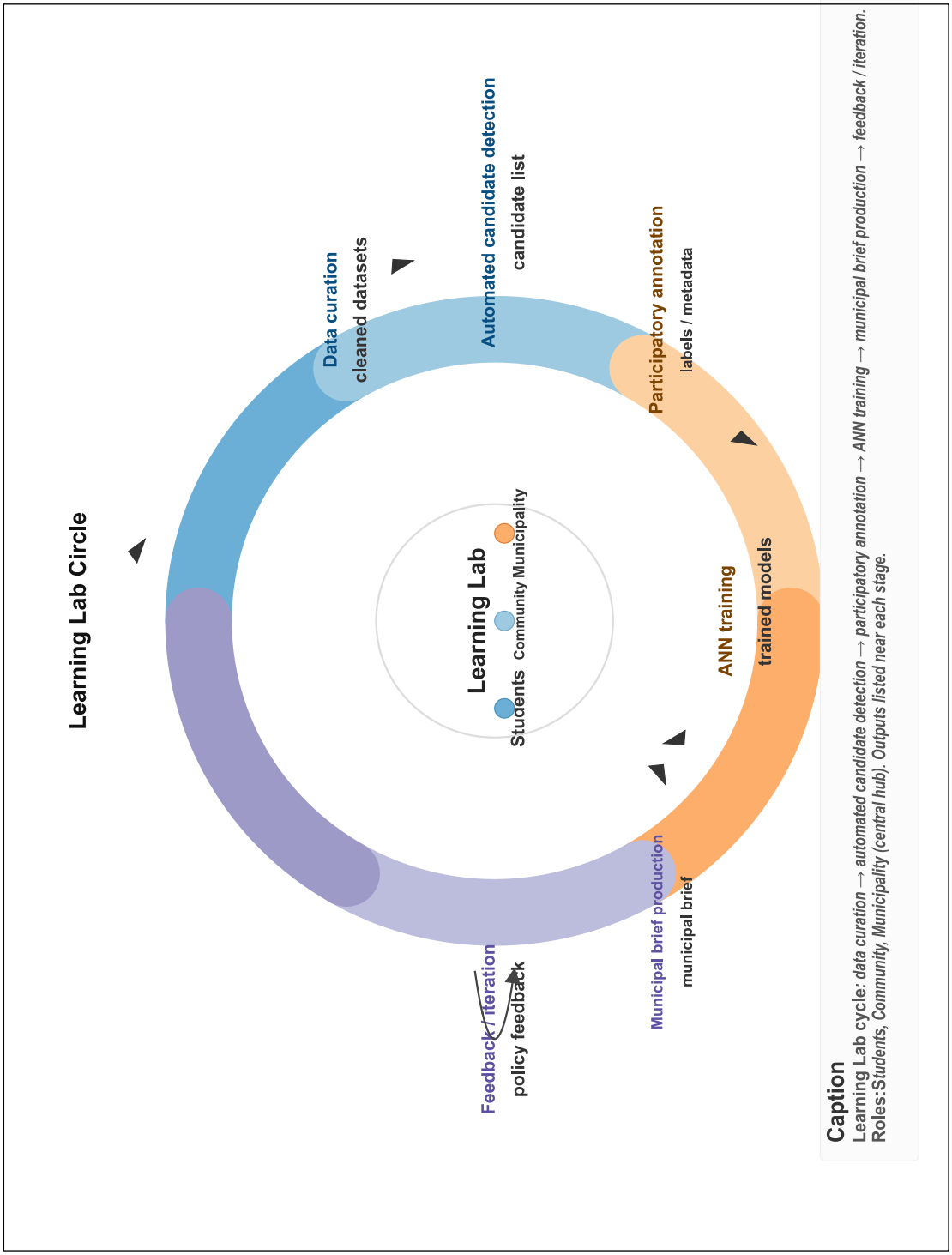


Fig. 7. The *Learning Lab* Cycle: participatory, iterative workflow linking data, models, and community validation

- Implementation roadmap, outlining short, medium, and long-term steps.

These packages were presented in municipal roundtables, where officials and community representatives jointly reviewed and refined them. The inclusion of uncertainty intervals and community validation increased credibility and facilitated integration into municipal information systems [5, 45].

Dissemination and uptake. Dissemination strategies emphasize accessibility and narrative richness. Outputs will be shared through story maps, short films, translated briefs, and low-band-width OERs, foregrounding community voices [21, 65]. MOOCs and micro-credentials integrate pilot results into curricula, ensuring scalability across the consortium.

It is expected the municipal officers report that the evidence packages are directly useful for early restoration planning, particularly in prioritizing inspections and aligning with NRL reporting obligations. The participatory validation process also enhance political legitimacy, reducing the risk of contested decisions [20].

Lessons for policy translation. The Kharkiv pilots highlight several lessons for translating participatory pedagogy into policy impact:

- Triangulation is essential: combining pixel, object, vector, and volumetric methods enhances robustness and credibility [25, 51];
- Transparency builds trust: explicit uncertainty statements increase municipal confidence in outputs [43];
- Community validation ensures legitimacy: participatory annotation and memory walks ground technical evidence in lived realities [2, 52];
- Narrative dissemination matters: story maps and films make evidence accessible to non-technical audiences, enhancing uptake [15, 16, 66].

Synthesis due to results and policy translation. The results of the Kharkiv pilots will demonstrate, that universities can act as catalysts of both socio-ecological recovery and urban renewal. By producing NRL-aligned evidence packages that are scientifically credible, socially legitimate, and governance-ready, the KKNU's team shows how participatory urbogeosystemic pedagogy can operationalize the NRL in post-war urban contexts. The translation of outputs into policy briefs, validated by communities and adopted by municipalities, underscores the transformative potential of this approach for Europe's restoration agenda.

Discussion: strengths, constraints, and scaling implications. *Strengths of the Kharkiv model.* The Kharkiv pilots are expected to demonstrate several notable strengths that position the model as a valuable contribution to the *FutureLand* consortium and the broader NRL agenda. Accessibility and reproducibility are central. By adopting an open data first strategy, the model reduces dependence on costly proprietary datasets and airborne LiDAR campaigns. Instead, it employs OSM, Sentinel, Landsat, DEMs, and free LiDAR sources, ensuring that workflows are replicable across municipalities with limited resources. This aligns with the NRL's emphasis on transparency and inclusivity.

Pedagogical innovation is another strength. The Learning Labs integrate technical training with participatory facilitation and trauma-informed pedagogy (Fig. 7). Students acquire not only geospatial competencies but also governance literacy and ethical reflexivity, preparing them to act as mediators between science, policy, and society. This dual focus on technical and civic capacities reflects the NRL's demand for socially legitimate restoration planning.

Community legitimacy is perhaps the most distinctive strength. By embedding memory walks, participatory annotation, and municipal roundtables, the model ensures that outputs reflect lived realities and contested narratives of place. This participatory validation increases the likelihood of municipal uptake and reduces the risk of contested decisions.

Finally, the model's policy relevance is clear. Outputs are packaged as NRL-aligned evidence briefs, complete with executive summaries, uncertainty statements, and implementation roadmaps. This format ensures that municipalities can integrate outputs directly into reporting and planning processes.

Constraints and limitations. Despite these strengths, the Kharkiv model faces several constraints too. Volumetric precision remains a challenge, despite significant involvement of LiDAR processing. Typological heuristics for 2.5D modeling provide useful proxies, but cannot replace engineering-level surveys. For structural assessments requiring high accuracy, LiDAR or unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry remains necessary [68].

Dependence on labeling quality is another limitation. ANN performance is highly sensitive to the quality and representativeness of training data (Fig. 6). While participatory annotation enhances legitimacy, it also introduces variability and requires significant facilitation.

Transferability poses further challenges. Models, which are expected to be trained in Kharkiv, may not generalize to other urban contexts without domain adaptation. Typological heuristics, for example, are context-specific and require calibration to local building forms and governance structures [19].

Security and continuity risks are also significant. Fieldwork in post-war contexts is vulnerable to disruption, and institutional continuity may be threatened by staff turnover or shifting priorities [1]. These risks necessitate flexible participation for-

mats, remote workflows, and embedding pedagogy in curricula for sustainability.

Scaling implications. Despite mentioned constraints, the Kharkiv model may offer valuable lessons for scaling across Europe. Crosslab exchanges within *FutureLand* (e.g., with Venice, Girona, Joensuu) provide opportunities for comparative evaluation of methodological tool-bundles, addressing evidence gaps identified in the literature [14]. Such exchanges will help refine the balance between qualitative, participatory, and technical methods. Shared repositories of benchmark datasets, OER modules, and municipal toolkits can facilitate replication. By curating open repositories with annotated datasets, model cards, and participatory facilitation guides, the consortium can lower barriers for adoption in other contexts.

Selective UAV campaigns and municipal surveys can be integrated cost-effectively to calibrate typological heuristics and improve volumetric accuracy. This hybrid approach balances open data pragmatism with targeted precision. Narrative dissemination is also critical for scaling. Story maps, films, and translated briefs make outputs accessible to nontechnical audiences, enhancing uptake across diverse governance contexts.

Finally, the Kharkiv model underscores the importance of trauma-informed pedagogy as a transferable principle. While developed in a postwar context, its emphasis on safety, trust, and empowerment is relevant to other vulnerable or marginalized communities across Europe.

Synthesis due to discussion. The Kharkiv pilots will illustrate both the promise and the challenges of participatory urbogeosystemic pedagogy in the NRL era. Strengths include accessibility, pedagogical innovation, community legitimacy, and policy relevance. Constraints include volumetric precision, labeling dependence, transferability, and security risks. Scaling requires crosslab exchanges, shared repositories, hybrid data strategies, narrative dissemination, and trauma-informed facilitation.

In sum, the Kharkiv model demonstrates that universities can act as catalysts of ecological recovery and social renewal, even under conditions of war and scarcity. By aligning open data pragmatism, participatory pedagogy, and urbogeosystemic thinking with the NRL governance requirements, the KKNU team offers a transferable blueprint for Europe's restoration agenda.

Synthesis and broader implications. The preceding sections of our paper have outlined a pedagogy and methodological pipeline designed to make nature restoration both technically robust and socially legitimate in post-war urban contexts. Synthesizing these threads points to several interlocking implications for how higher education institutions, municipal partners, and civil society can co-produce restoration knowledge and action.

First, the integration of open technical workflows with participatory, trauma-aware facilitation creates opportunities to deliver evidence that is both scientifically defensible and credible to local communities. The technical pipelines – from multispectral preprocessing to object-based change detection and lightweight neural networks – generate actionable spatial outputs; the participatory processes ensure those outputs are interpreted, validated and contextualized against lived experience and local priorities. This combination reduces the risk that technical maps are perceived as external impositions, and increases their likelihood of uptake in municipal planning.

Second, the Learning Lab model fosters reciprocal capacity building. Students gain methodological fluency and ethical competency, while municipal staff and community participants acquire practical tools and documentation they can use beyond the immediate project. Where universities operate as convenors, they can help translate cross-sectoral knowledge into municipal roadmaps for phased restoration. The co-creation of evidence packages – including executive summaries, uncertainty statements, and implementation roadmaps – makes academic work legible and useful to decision-makers who must balance ecological objectives with social and economic constraints.

Third, the emphasis on explainable machine learning and human-verified training sets addresses a common tension in civic AI applications: transparency versus performance. By basing models on community-annotated samples and pairing outputs with explainability artifacts (heatmaps, feature-attribution summaries), the pedagogical pipeline avoids black-box solutions and empowers local stakeholders to understand and challenge model findings. This practice supports not only better technical outcomes, but also stronger democratic oversight of algorithmic tools used in public decision-making.

Fourth, the 2.5D pragmatic modeling approach is a practical compromise where full airborne LiDAR is unavailable. While vertical precision is reduced compared with full LiDAR, typological height heuristics and conditional validation provide useful proxies that keep workflows reproducible and accessible. Importantly, every proxy is accompanied by explicit uncertainty bands and validation notes so municipal planners can weigh evidence proportionally. This transparent treatment of uncertainty – documented in methodological appendices and model cards – increases trust and supports incremental decision-making under resource constraints.

Fifth, the pedagogical emphasis on site-specific

memory, cultural values and social infrastructure reframes restoration away from purely ecological metrics toward integrated social-ecological goals. Restoration scenarios that do not attend to displacement, access to services, or cultural meaning risk generating interventions that are technically sound but socially counterproductive. Embedding narrative methods – oral histories, memory walks, and community workshops – ensures that restoration choices reflect not only biophysical potential but also community conceptions of wellbeing, dignity and place.

Sixth, the pilots will highlight the importance of flexible, contingency-aware project design in contexts affected by war. Remote-friendly formats, low-bandwidth resources, and modular lab units help sustain participation despite disruptions. Moreover, the practice of building multiple entry points for engagement (online annotation, small-group workshops, municipal briefings) may increase inclusivity and reduce single points of failure. These practical designs may be especially important in fragile contexts where travel, access to datasets, or institutional continuity may be limited.

Seventh, the dissemination strategy proposed in *WP5* package [21] – combining storytelling, multilingual materials, and targeted roundtables – amplifies impact. Storytelling and visual narratives make technical findings accessible to non-specialist audiences and help shift public conversation about restoration from abstract policy to concrete local initiatives. Meanwhile, targeted exchanges with municipalities and NGOs support the translation of learning lab outputs into pilot projects, funding proposals, and regulatory advice. Ensuring Ukrainian voices are central in these dissemination channels reinforces equity and helps to reframe European debates about restoration to include experience from war-affected territories.

Eighth, scaling and transferability will require careful governance and methodological documentation. Cross-lab comparability demands standardized metadata practices, shared model cards, and reproducible scripts so that evidence generated in different cities can be meaningfully compared. The *FutureLand* consortium's cross-lab exchanges provide a platform for iterative refinement: comparative experiments will reveal which bundles of methods perform consistently, and which require local adaptation. Institutional memory – in the form of well-documented workflows, OERs and policy briefs – will be essential for long-term adoption.

Ninth, monitoring and evaluation frameworks must capture both learning outcomes and community-level change. Traditional academic metrics (publications, citations, course completions) are inadequate for judging success in participatory restoration. Instead, success metrics should combine student competency measures with indicators of community benefit: documented improvements in access to green space, evidence of local uptake of co-designed measures, and sustained partnerships between universities and municipal actors. Mixed-method evaluation designs, including pre-post competency testing, community surveys, and process tracing of policy uptake, will provide more holistic evidence of impact.

Tenth, ethical governance and data stewardship remain central challenges. Even with strong participatory protocols, questions about data ownership, benefit-sharing and long-term stewardship persist. Clear agreements are needed about who holds annotated datasets, how sensitive locations are masked, and how benefits from restored sites are distributed. Institutional arrangements that formalize these norms – through memorandum of understanding, community data trusts, or municipal- university agreements – will help protect participants while enabling reuse of evidence for planning.

Eleventh, the educational implications for curricula are significant. Restoration education should not be an elective add-on but integrated across urban planning, geography, environmental science and humanitarian studies. Course sequences that combine technical skills (remote sensing, GIS, basic machine learning) with participatory competencies (facilitation, ethics, community engagement) produce graduates capable of navigating the interdisciplinary nature of contemporary restoration work. Micro-credentials and stackable modules, made available through the MOOC and partner institutions, can accelerate capacity building among practitioners already in the field.

Twelfth, future research priorities include longitudinal studies of lab impacts, cross-cultural model adaptation, and the economics of phased restoration. Longitudinal tracking of learning labs will show how student competencies evolve, and whether municipal partners continue to use evidence packages after project close. Research that compares methodological bundles across contrasting governance contexts will sharpen transferability. Finally, cost-effectiveness studies of incremental restoration strategies – combining low-cost green infrastructure with targeted social investments – will help municipalities prioritize interventions under fiscal constraints.

Practical recommendations and concluding reflection. From the synthesis above, a set of pragmatic recommendations emerges for partners and practitioners who aim to adopt the KKNU model:

1. Prioritize participatory annotation early in workflows to ground models in lived experience.

2. Publish model cards and uncertainty statements with every evidence package to support municipal decision-making.
3. Use modular lab units that can be recombined depending on access and bandwidth constraints.
4. Invest in trauma-aware facilitation training for students and staff working in post-war contexts.
5. Formalize data governance and benefit-sharing agreements with community partners.
6. Design monitoring frameworks that capture both learning and community-level outcomes.

In combining open technical workflows with human geographical and humanitarian practices, the KKNU model offers a practical route toward restoration pedagogy that is both rigorous and humane. The pilot work in Kharkiv will illustrate how universities act as convenors and translators – producing evidence that municipal decision-makers can use and communities can trust. As *FutureLand* progresses, iterative refinement through cross-lab exchanges, careful documentation, and a sustained commitment to participation will be essential. The enduring goal is to enable restoration that heals ecological systems while restoring social fabrics – a dual purpose that is both technically demanding and morally imperative.

Addendum: practical tools, templates, and teaching aids. To support rapid adoption, partners should be provided with a compact toolkit of practical resources that can be applied directly in Learning Labs and municipal collaborations. These resources include: a short workshop template for a one-day participatory mapping event, a compact syllabus for a four-week module on *Urban Post-War Nature Restoration*, an assessment rubric for mixed-method projects, and a lightweight data stewardship checklist. The workshop template outlines objectives, a one-day timetable, materials checklist, ethical safeguards, and a simple facilitation script for trauma-aware engagement. The syllabus provides week-by-week learning outcomes, readings, practical assignments, and guidance for integrating remote sensing exercises with community workshops. The assessment rubric balances technical correctness, ethical facilitation, community engagement, and policy relevance, giving equal weight to reproducibility and social legitimacy.

A compact data stewardship checklist clarifies roles and responsibilities: where annotated datasets are stored, who controls access, how sensitive locations are masked, and how community partners can request data deletion or review. These governance templates should be adaptable: some partners will need municipal-level memorandum, others will benefit from informal agreements that match community norms. The goal is to lower transaction costs for faculty and partners so that labs can focus on evidence generation and dialogue instead of negotiating basic procedural elements.

Practical software stacks and deployment tips are equally important. For classroom use, provide containerized notebooks (or cloud-hosted GEE scripts) that perform core preprocessing tasks: coordinate harmonization, cloud masking, index computation, and simple OBIA segmentation. Offer a small set of curated LiDAR subsets or DEM-based 2.5D proxies so students can run end-to-end exercises on standard laptops. Include example annotation projects with step-by-step guides for workshop facilitation and quality control checks. A brief troubleshooting appendix should cover common issues: mismatched projections, cloud contamination, and imbalance in training samples.

The *City Change Management* desktop software [28, 31] will play a key performance in all these activities.

Finally, build a compact teacher training module: a short, modular course that prepares instructors for trauma-aware facilitation, participatory annotation management, and the integration of explainable AI outputs into community dialogues. The training emphasizes reflective practice: instructors should be encouraged to keep short process journals that record choices, ethical dilemmas and community feedback. These reflective notes are valuable both for iterative improvement and for documenting civic impact in project reports and policy briefs.

Together, these pragmatic templates and resources reduce entry barriers, encourage methodological consistency, and help sustain high-quality, people-centered restoration pedagogy across diverse partner contexts.

Closing note on collaboration. Sustained collaboration requires time, trust and modest resourcing. Small investments – a shared dataset repository, modest travel support for community partners, and a recurring review meeting – yield disproportionate returns when partnerships are built on mutual respect and shared purpose. By committing to iterative learning, transparent documentation, and active listening, partners can turn pilot successes into long-term municipal practices that restore both urban ecosystems and civic life within the cities. We remain committed to co-design, to rigorous evidence, and to listening as the first act of restoration.

Conclusion

The Kharkiv pilots within the Erasmus+ *FutureLand* project demonstrate that urban restoration in the NRL era must be understood as both an ecological, socio-environmental, and educational process. By combining urbogeosystemic thinking, open data pragmatism, participatory pedagogy, and trau-

ma-informed facilitation, the KKNU team will develop a model that would be simultaneously scientifically credible, socially legitimate, and governance-ready.

Technically, the model shows that open datasets - OSM, satellite imageries, DEMs, LiDAR point clouds. If combined with pragmatic 2.5D modeling and participatory annotation it can generate NRL-aligned indicators even in resource-constrained, post-war contexts. Multimethod change detection and lightweight, explainable ANN workflows provide robust evidence while remaining accessible to students and municipalities.

Pedagogically, the Learning Labs cultivate a new generation of restoration specialists who are not only proficient in geospatial analysis but also skilled in facilitation, ethical reflexivity, and policy translation. Trauma-informed protocols ensure that community engagement is safe, respectful, and empowering, avoiding extractive tendencies and fostering resilience.

For communities, the pilots will reengage residents in shaping their urban futures, embedding memory, identity, and aspirations into restoration planning. For municipalities, the outputs will be delivered as concise, NRL-aligned evidence packages, complete with uncertainty statements and implementation roadmaps, enhancing both credibility and uptake.

The Kharkiv experience underscores the potential of universities to act as catalysts of urban ecological renovation and social recovery. By aligning technical innovation with participatory ethics and policy imperatives, our team offers a transferable blueprint for Europe's restoration agenda. Future scaling will require crosslab exchanges, shared repositories, and hybrid data strategies, but the foundation is clear: restoration as recovery is not only possible, it is essential for building resilient, democratic, and sustainable urban futures, particularly, in Ukraine after this awful war.

List of Abbreviations

ANN – artificial neural network
CBL – challenge-based learning
CNN - convolutional neural network
KKNU – V.N. Karazin Kharkiv national university
LiDAR – light detection and ranging
MLP - multi-layer perceptron
MOOC – massive open online course
NRL – nature restoration law
OBIA – object-based image analysis
OER – open educational resources
OSM – open street map
PAR – participatory action research
UAV - unmanned aerial vehicle
UES – urban ecological system
UE – urbanistic environment
UGS – urbogeosystem
URS – urban remote sensing

References

1. *Anderson R. K., Landy M., Sanchez V. [and other] (2023). Trauma-informed pedagogy in higher education: Considerations for the future of research and practice. Journal of Trauma Studies in Education, 2(2). Available at: https://journals.library.appstate.edu/index.php/JTSE/article/view/212*
2. *Ballard H. L., Belsky J. M. (2010). Participatory action research and environmental learning: Implications for resilient forests and communities. Environmental Education Research, 16(5-6), 611–627. DOI: https://doi.org/10.1080/13504622.2010.505440*
3. *Battisti C., Baiani D. S. (Eds.). (2022). Urban agglomeration: Models and strategies for regeneration of residential buildings and outdoor public spaces. IntechOpen. DOI: https://doi.org/10.5772/intechopen.102366*
4. *Biljecki, F., Stoter, J., Ledoux, H., Zlatanova, S., & Çöltekin, A. (2015). Applications of 3D city models: State of the art review. ISPRS International Journal of Geo-Information, 4(4), 2842–2889. DOI: https://doi.org/10.3390/ijgi4042842*
5. *BirdLife International. (2024). State of the World's Birds: 2024 Annual Update. Available at: https://datazone.birdlife.org/articles/state-of-the-worlds-birds-2024-annual-update*
6. *Birney L. B., McNamara D. M. (2023). The Curriculum and Community Enterprise for Restoration Science: Making STEM accessible, equitable, and environmentally relevant. NSF Public Access Repository. Available at: https://par.nsf.gov/biblio/10346894*
7. *Boulila W., Ghandorh H., Khan M. [and other] (2021). A novel CNN-LSTM-based approach to predict urban expansion. Ecological Informatics. 64, 101325. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101325*
8. *Brovelli M. A., Zamboni G. (2018). A New Method for the Assessment of Spatial Accuracy and Completeness of OpenStreetMap Building Footprints. ISPRS International Journal of Geo-Information, 7(8), 289. DOI: https://doi.org/10.3390/ijgi7080289*
9. *Brenner C. (2000). Extracting urban objects from airborne laser scanner data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 33(B3/2), 29–36.*
10. *Carello J., Butler L. D. (2015). Practicing what we teach: Trauma-informed educational practice. Journal of Teaching in Social Work, 35(3), 262–278. DOI: https://doi.org/10.1080/08841233.2015.1030059*
11. *Cheng L., Wu Y., Tong L., Chen Y., Li M. (2015). Hierarchical registration method for airborne and vehicle LiDAR point cloud. Remote Sensing 7, 13921–13944. https://doi.org/10.3390/rs71013921.*

12. Chevalier J. M., Buckles D. J. (2013). Participatory action research: theory and methods for engaged research. London: Routledge: 496. DOI: https://doi.org/10.4324/9780203107386
13. Chollet F. (2017). Xception: Deep learning with depth-wise separable convolutions. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 1800–1807. DOI: https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.195
14. Durrant E., Howson P., Puttick B. [and other] (2023). Existing evidence on the use of participatory scenarios in ecological restoration: a systematic map. Environmental Evidence, 12, 27. DOI: https://doi.org/10.1186/s13750-023-00314-1
15. Elwood S. (2009). Integrating participatory action research and GIS education: Negotiating methodologies, politics and technologies. Journal of Geography in Higher Education, 33(1), 51–65. DOI: https://doi.org/10.1080/03098260802276565
16. Elwood S. (2009). Critical issues in participatory GIS: Deconstructing the specter of objectivity. Annals of the Association of American Geographers, 99(1), 128–143. DOI: https://doi.org/10.1080/00045600802633309
17. European Commission (EC). (2024). Nature Restoration Regulation. European Commission – Environment. Available at: https://environment.ec.europa.eu/topics/nature-and-biodiversity/nature-restoration-regulation_en
18. European Parliament (EP) (2024). Legislative resolution of 27 February 2024 on the proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council on nature restoration (COM(2022)0304 – C9-0208/2022 – 2022/0195(COD)). Official Journal of the European Union, C/2024/6757. Available at: EUR-Le
19. Feng H., Chen Y., Luo Z. [and other] (2022). Automated extraction of building instances from dual-channel airborne LiDAR point clouds. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 114, 103042. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103042.
20. Fox H., Cundill G. (2018). Towards increased community-engaged ecological restoration: A review of current practice and future directions. Ecological Restoration, 36(3), 208–218. DOI: https://doi.org/10.3368/er.36.3.208
21. FutureLand Consortium (FLC). (2025). FutureLand – Nature Restoration: challenges and opportunities for future landscape specialists (KA220-HED application). Unpublished application.
22. Goodchild M. F. (2009). Geographic information systems and science: Today and tomorrow. International Journal of Geographical Information Science, 23(10), 1371–1374. DOI: https://doi.org/10.1080/19475680903250715
23. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. (2016). Deep Learning. MIT Press. Available at: https://www.deeplearningbook.org/
24. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. (2016). Deep residual learning for image recognition. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 770–778. DOI: https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90
25. Hussain M., Chen D., Cheng A., Wei H., Stanley D. (2013). Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 80, 91–106. DOI: https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.03.006
26. Johnson-Lawrence V., Sneed R., Dotson K. [and other] (2024). Trauma-informed approaches and community engagement in post-war mapping. National Library of Medicine. RTI Press. Available at: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK607457/
27. Kingma D. P., Ba J. (2014). Adam: A method for stochastic optimization. arXiv preprint arXiv:1412.6980. https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.6980
28. Kostrikov, S., Serohin, D. (2025). Urban change detection with airborne LiDAR for hostilities' impact estimation: a case study of Kharkiv. European Journal of Remote Sensing, 58 (1). DOI: https://doi.org/10.1080/22797254.2025.2491750
29. Kostrikov S. Niemets L., Sehida K. [and other] (2018). Geoinformation approach to the urban geographic system research (case studies of Kharkiv region). Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series "Geology. Geography. Ecology", (49), 107-121. DOI: https://doi.org/10.26565/2410-7360-2018-49-09
30. Kostrikov S., Seryogin D. (2022). Urbogeosystemic Approach to Agglomeration Study within the Urban Remote Sensing Frameworks. Urban Agglomeration. Edited by A. Battisti and S. Baiani: Intech Open, London, Milan, Zagreb. 251-273. DOI: http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.102482
31. Kostrikov S., Niemets L., Robinson D., Mezentsev K., Kravchenko K., Serohin D. (2024). Delineation of the Hostilities' Impact on Urban Environment by LiDAR Data Processing (a Case Study of Kharkiv). In: Morar, C., Berman, L., Erdal, S., Niemets, L. (eds) Achieving Sustainability in Ukraine through Military Brownfields Redevelopment. NATOARW 2023. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Springer, Dordrecht. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-024-2278-8_22
32. Kostrikov S. (2025). Analyzing urban morphology changes using neural networks. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (62), 219-236 https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-17
33. Kostrikov S., Pudlo R., Bubnov D., Vasiliev V. (2020). ELiT, multifunctional web-software for feature extraction from 3D LiDAR point clouds. ISPRS International Journal of Geo-Information. 9(11), 650-885. DOI: http://dx.doi.org/10.3390/ijgi9110650

34. Kostrikov S., Kravchenko K., Serohin D., Bilianska S., Savchenko A. (2023). The performance of the digital city projects in urban studies of the megalopolises (the case studies of Kharkiv and Dnipro cities). Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (59), 140-165. DOI: https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-11
35. Kostrikov S., Pudlo R., Bubnov D., Vasiliev V., Fedyay Y., 2020. Automated Extraction of Heavyweight and Lightweight Models of Urban Features from LiDAR Point Clouds by Specialized Web-Software. Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J. 5, 72-95. DOI: https://dx.doi.org/10.25046/aj050609
36. Kowarik I., Fischer L.K., Haase D. [and other] (2025). Promoting urban biodiversity for the benefit of people and nature. Nat. Rev. Biodivers. 1, 214–232. DOI: https://doi.org/10.1038/s44358-025-00035-y
37. Kravchenko K., Niemets L., Sehida K. (2024). War consequences and prospects for post-war reconstruction (case of Ukrainian urban agglomerations). Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (61), 193-211. DOI: https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-16
38. Langemeyer, J., Busse, S., Arabas, A. et al. (2025). Social-ecological justice in cities: a spatial vulnerability approach. npj Urban Sustain 5, 46. DOI: https://doi.org/10.1038/s42949-025-00234-8
39. LeCun Y., Bottou L., Bengio Y., Haffne, P. (1998). Gradient-based learning applied to document recognition. Proceedings of the IEEE, 86(11), 2278–2324. DOI: https://doi.org/10.1109/5.726791
40. Lin T.-Y., Goyal P., Girshick R., He K., Dollár P. (2017). Focal loss for dense object detection. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2980–2988. DOI: https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.324
41. Lohmus A. (2025).recognizing and mitigating key uncertainties about the future in ecological restoration planning. Restoration Ecology, 32(8), e13321. DOI: https://doi.org/10.1111/rec.70158
42. Lundberg S. M., Lee S.-I. (2017). A Unified Approach to Interpreting Model Predictions. Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS), 4768–4777. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1705.07874
43. Maas H.-G., Vosselman G. (1999). Two algorithms for extracting building models from raw laser altimetry data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54(2–3), 153–163. DOI: https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00004-0
44. McMahon B. J. (2023). Trauma-informed pedagogy: A framework for teacher preparation and practice. In E. Stromberg (Ed.), Trauma-Informed Pedagogy in Higher Education: A Faculty Guide for Teaching and Learning, 45-60. Routledge. DOI: https://doi.org/10.4324/9781003260776
45. Moore E., Howson, P., Grainger M. [and other]. (2022). The role of participatory scenarios in ecological restoration: a systematic map protocol. Environmental Evidence, 11, 23 (2022). DOI: https://doi.org/10.1186/s13750-022-00276-w
46. Morar, C., Lukić, T., Valjarević, A. [and other]. (2022). Spatiotemporal analysis of urban green areas using change detection: A case study of Kharkiv, Ukraine. Frontiers in Environmental Science, 10, 823129. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.823129
47. Mueller H., Groeger A., Hersh A. [and other]. (2021) Monitoring war destruction from space using machine learning, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 118 (23) e2025400118. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.2025400118
48. Narkhede J. Comparative Evaluation of Post-Hoc Explainability Methods in AI: LIME, SHAP, and Grad-CAM," 2024 4th International Conference on Sustainable Expert Systems (ICSES), Kaski, Nepal, 2024, 826-830, DOI: https://doi.org/10.1109/ICSES63445.2024.10762963
49. Penca J., Tănăsescu, M. (2024). The transformative potential of the EU's Nature Restoration Law. Sustainability Science. Advance online publication. DOI: https://doi.org/10.1007/s11625-024-01610-6
50. Perissi I. (2025). Assessing the EU27 potential to meet the Nature Restoration Law targets. Environmental Management, 75(4), 711–729. https://doi.org/10.1007/s00267-024-02107-9
51. Radke, R. J., Andra, S., Al-Kofahi, O., & Roysam, B. (2005). Image change detection algorithms: A systematic survey. IEEE Transactions on Image Processing, 14(3), 294–307. DOI: https://doi.org/10.1109/TIP.2004.838698
52. Rambaldi G. (2010). Participatory Three-Dimensional Modelling: Guiding Principles and Applications. Technical Centre for Agricultural and Rural Cooperation (CTA). Available at: https://participatorygis.blogspot.com/2010/10/our-forest-our-dignity-forest-dependent.html
53. Sampath A., Shan J. (2010). Building reconstruction from airborne LiDAR point clouds. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, I-3, 163–168. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2009.2030180
54. Selvaraju R. R., Cogswell M., Das A., Vedantam R., Parikh D., Batra, D. (2017). Grad-CAM: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 618–626. DOI: https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.74
55. Shafian S., He C., Hu D. (2025). DamageScope: An Integrated Pipeline for Building Damage Segmentation, Geospatial Mapping, and Interactive Web-Based Visualization. Remote Sensing, 17(13), 2267. DOI: https://doi.org/10.3390/rs17132267

56. Stephens D. W. (2020). Trauma-Informed Pedagogy for the Religious and Theological Higher Education Classroom. Religions, 11(9), 449. DOI: https://doi.org/10.3390/rel11090449
57. Stilla U., Xu Y. (2023). Change detection of urban objects using 3D point clouds: A review. ISPRS J. Photogram. Remote Sens. 197, 228-255. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2023.01.010.
58. Stoter J., van den Brink L., Ledoux H. (2016). 3D cadaster implementations and challenges. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, III-4, 1–8. DOI: https://doi.org/10.5194/isprs-annals-III-4-1-2016
59. Tadono T., Ishida H., Oda F., Naito S., Minakawa K., Iwamoto H. (2014). Precise Global DEM Generation by ALOS PRISM. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-4, 71–76. DOI: https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-4-71-2014
60. Tian S., Zhong Y., Zheng Z. [and other] (2022). Large-scale deep learning based binary and semantic change detection in ultra high resolution remote sensing imagery. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 193, 164–186. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.08.012
61. Toomey, A., Smith, J., Becker, C., Palta, M., & Moore, T. (2023). Towards a pedagogy of social–ecological collaborations: Engaging students and urban nonprofits for an ecology with cities. Urban Ecosystems, 26, 425–432. DOI: https://doi.org/10.1007/s11252-023-01343-x
62. UNECE. UN4UkrainianCities. Supporting Kharkiv's Path to Recovery with the Comprehensive Restoration Program. UN Report (2024). Available at: https://www.un4ukrainiancities.org/news/supporting-kharkivs-path-to-recovery-with-the-comprehensive-restoration-program-1
63. Vance-Chalcraft H. D., Hurlbert A. H., Styrsky J. N. [and other] (2022). Ecological service-learning positively impacts classroom climate and empowers undergraduates for environmental action. Ecosphere, 13(5), e4039. DOI: https://doi.org/10.1002/ecs2.4039
64. Wang X., Zhang L., Li H. (2020). A deep Siamese network with hybrid convolutional feature extraction module for change detection in multi-sensor remote sensing images. Remote Sensing, 12(2), 205. DOI: https://doi.org/10.3390/rs12020205
65. Webster S., Thompson P., Carello J. (2022). Trauma-informed pedagogies: A guide for responding to crisis and inequality in higher education. Textbook. Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-92705-9
66. Wiley D. R., Abernathy D. R. (2023). The next layer: Towards open pedagogy in geospatial education. Transactions in GIS, 27(2), e13081. DOI: https://doi.org/10.1111/tgis.13081
67. Yu D., Fang, C. (2023). Urban Remote Sensing with Spatial Big Data: A Review and Renewed Perspective of Urban Studies in Recent Decades. Remote Sensing, 15(5), 1307. DOI: https://doi.org/10.3390/rs15051307
68. Zhou Y., Rupnik E., Meynard C., Thom, C., Pierrot-Deseilligny M. (2020). Simulation and Analysis of Photogrammetric UAV Image Blocks–Influence of Camera Calibration Error. Remote Sensing, 12(1), 22. DOI: https://doi.org/10.3390/rs12010022
69. Zhu Z., Woodcock C. E. (2014). Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. Remote Sensing of Environment, 144, 152–171. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.011

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Відновлення через відбудову: партисипативна урбогеосистемна педагогіка Каразінського університету для проєкту Erasmus+ *FutureLand*

Сергій Костріков [1]
д. геогр. н., професор, кафедра соціально-економічної географії
і регіонознавства імені Костянтина Нємця,
[1] Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, Україна;
Людмила Нємець [1]
д. геогр. н., професор, кафедра соціально-економічної географії
і регіонознавства імені Костянтина Нємця

Стаття описує концепцію педагогічної та методологічної моделі, яка буде розроблена у рамках проєкту *FutureLand*. Модель спрямована на впровадження вимог Європейського закону про відновлення природи (NRL), який зобов'язує відновлювати міські екосистеми, зокрема в постраждалих від війни містах. Ключовою інновацією стане урбогеосистемна педагогіка, що поєднує відкриті геопросторові дані з партисипативними Навчальни-

ми лабораторіями та травма-орієнтованою фасилітацією. Автори пропонують партисипативну методику викладання, адаптовану до пост-воєнної відбудови та подальшого відновлення. Методика спирається на підходи урбогеосистемного аналізу та геопросторові інструменти. Отже, головною дослідницькою метою цієї статті є представлення трансферної (модель, що має потенціал масштабування) травма-орієнтованої партисипативної педагогіки. Методологічно майбутня модель будуватиметься на урбогеосистемній концепції міста. Остання демонструє, як Урбаністичне середовище, Урбогеосистема та Міська екологічна система структурно пов'язані: растрова діагностика, векторне подання та соціо-екологічні процеси сходяться в єдиній моделі. Разом вони дозволяють педагогіці відновлення трансформувати просторові дані у соціально легітимні та екологічно обґрунтовані міські середовища. Методологічно модель також спирається на принцип «open data first»: використання відкритих геопросторових даних та муніципальних LiDAR-порталів. Для виявлення урбаністичних змін поєднуються хмари лідарних точок, а також легкі нейронні мережі з пояснюваними результатами. Ключовим інструментом педагогічної моделі стануть Навчальні лабораторії, де студенти, громади та представники міської влади спільно збиратимуть й аналізуватимуть дані, проводитимуть «прогулянки пам'яті», партисипативне картографування та оцінку результатів. Можна сподіватися, що пілотні застосування у Харкові доведуть практичну ефективність моделі: буде створено карти змін забудови та зелених зон, підготовлено сценарії відновлення, буде розроблено пакети доказів для муніципалітету з чіткими показниками та планами реалізації. Таким чином, представлена концепція демонструє, що навіть у післявоєнних умовах наш університет, завдяки участі у проєкті *FutureLand*, може стати каталізатором інфраструктурної відбудови, екологічного відновлення та соціального оновлення. Модель, що відповідає запропонованій концепції, буде масштабованою та може бути адаптована для інших європейських міст, які стикаються з викликами деградації довкілля та складного врядування.

***Ключові слова**: Європейський закон щодо відновлення природи, партисипативна педагогіка, урбогеосистемний підхід, урбаністична екосистема, навчальні лабораторії, міське дистанційне зондування, лідар, ШНМ.*

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу
Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 1 вересня 2025 р.
Прийнята 23 жовтня 2025 р.

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-19
UDC 338.48:394
Received 27 June 2025
Accepted 23 October 2025

Ethnographic Complexes as Catalysts for Regional Development: Insights from Chernihiv Region

Anastasiia Makeieva
PhD student of the Department of Regional and Tourism Studies,
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, 01033, Ukraine,
e-mail: makeeva.nastya2019@gmail.com, https://orcid.org/0009-0007-1372-7822

ABSTRACT

Problem Statement. The reconstruction of public infrastructure destroyed by Russian aggression, along with the restoration of political, socio-economic, and cultural activity in the de-occupied territories, is an urgent need for the sustainable development of Ukraine's regions and local communities. In this context, tourism and excursion activities, particularly ethnographic tourism as their integral component, can and should become a powerful driver of local development. There is a pressing need for comprehensive research into the functioning of ethnographic tourism complexes under martial law, their financial and organizational potential as hubs of local entrepreneurship, preservation of historical and cultural heritage, enhancement of social cohesion, and post-war community development.

The purpose of the article is to examine the role of ethnographic tourism complexes in the sustainable socio-economic development of territorial communities located in de-occupied regions of Ukraine.

Research methods. To achieve this objective, the study applied a combination of qualitative and quantitative research methods: analysis and synthesis, statistical methods, case study and SWOT analysis.

Results. The analysis revealed that "Sokolynyi Khutir" functions as a multifunctional tourism and cultural complex that combines ethnographic, museum, and entrepreneurial activities. The complex provides employment, supports local self-governance, fosters the cultural identity of the territorial community, and contributes to the preservation and promotion of both tangible and intangible cultural heritage. Its active involvement in social, charitable, and international initiatives strengthens social cohesion and enhances the tourist appeal of the destination. Between 2023 and 2024, the number of visitors increased, largely due to innovative approaches to cultural communication and digital promotion. The economic dimension of the complex's activity is reflected in the growth of local budget revenues and the attraction of tourist and excursion flows, despite the challenging conditions of wartime.

The novelty. This study presents the first comprehensive assessment of a privately owned ethnographic tourism complex operating under martial law from the standpoint of sustainable development criteria. The effectiveness of cultural and entrepreneurial practices in preserving national heritage and enhancing social stability within territorial communities is analyzed. The findings of the study can be used by local authorities, entrepreneurs, and researchers in developing strategies for the post-war recovery and development of de-occupied areas through the means of ethnographic tourism.

***Keywords**: sustainability, socio-economic development, territorial community, ethnographic complex, tourism, museum space, ethno-village, ethnographic tourism, open-air museums.*

In cites: Makeieva Anastasiia (2025). Ethnographic Complexes as Catalysts for Regional Development: Insights from Chernihiv Region. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 256-265. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-19

Introduction. Despite the challenges of martial law, many regions of Ukraine – particularly in the western and central parts – are currently experiencing a gradual revival of entrepreneurial, including tourism-related, activities. National and regional strategies and post-war recovery programs for the tourism sector are being developed, while scientific research is being conducted on the spatial organization of tourism, the functioning of existing destinations, and the formation of new tourist centers.

There is a noticeable adaptation of Ukraine's tourism sector to new realities, which leads to the re-emergence of Ukraine as a tourist destination from a previously unknown perspective. Convincing evidence of this is provided by the official data from the State Agency for Tourism Development of Ukraine (SATD), which indicates a certain level of entrepreneurial activation within the tourism sector despite the current extremely difficult conditions. In 2024, the number of registered legal and physical entities in the tourism field increased to 17,649, which is 7% more than in 2023 [1].

A particularly urgent issue is the gradual restoration of tourism potential in the de-occupied territories, especially in central and northern oblasts of Ukraine, which have not experienced long-term active hostilities and whose areas have been demined and are relatively safe for tourism and excursion activities.

Attention should also be drawn to the process of reviving and developing rural guesthouses that offer services within the agrotourism sector. These facilities play an important role in preserving national cultural heritage and promoting local traditions, customs, folk crafts, and household culture. In addition, their activity enhances the socio-economic vibrancy of rural areas by creating jobs, developing infrastructure, and increasing local budget revenues.

The purpose of this study is to investigate the role of ethnographic complexes in the sustainable

© Makeieva Anastasiia, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

socio-economic development of territorial communities located in de-occupied areas.

The object of the study is tourism activity in regions undergoing post-war recovery.

The subject of the study is the functioning of an ethnographic complex as a driver of cultural heritage preservation, national identity formation, and local entrepreneurship and tourism development.

Analysis of recent research and publications. The author believes that particular attention should be paid to ethnographic tourism as a form of increasing interest in national historical and cultural traditions. A wide range of foreign and Ukrainian tourism scholars have dedicated their research to the impact of ethnographic tourism on cultural heritage preservation, sustainable territorial development, and intercultural dialogue. It is important to note that the term "ethnographic tourism" was first introduced into academic discourse by American scholar V. Smith (1989), who defined it as a unique type of tourism aimed at exploring the distinctive customs of indigenous and other peoples.

Over time, numerous interpretations of the term have emerged in foreign academic literature. Among the most significant, according to the author, are the works of Graburn (1983) [3], Harron and Weiler (1992) [4,], Butler (1996) [5], Richards (1996) [6], Goeldner and Ritchie (2011) [7], Wang, Shen, Yea, and Lingqiang (2020) [8], Lama and Sarkhel (2022) [9], and Yang and Wall (2023) [10].

Various aspects of ethnographic tourism development are also the subject of research by Ukrainian scholars. Foundational conceptual and methodological approaches to this phenomenon are presented in the works of Melko (2003) [11], Ustymenko (2011) [12], Dutchak (2013) [13], Havryliuk (2013) [14], Holod and Mysiak (2015) [15], and others. In particular, a detailed and meaningful definition is offered by L. Ustymenko (2011) [12], who argues that ethnographic tourism is "a type of cognitive tourism primarily aimed at visiting ethnographic objects that represent the historical heritage of a people who lived in a particular area". The author of this article concurs with this interpretation, as it comprehensively reveals the concept of ethnographic tourism, with emphasis on its origins, functioning, and development within the Ukrainian context. Recent Ukrainian studies also explore the relationship between ethnographic tourism and agrotourism, the preservation of intangible heritage, and the development of ethnographic villages as forms of community-based tourism.

European experience in developing ethnographic tourism demonstrates that one of its specific components is the ethnovillage, which represents reconstructed or preserved settlements designed to showcase the traditional lifestyle, culture, architecture, and crafts of a specific ethnic group. This form is particularly common in the countries of the Balkan Peninsula. For example, in Serbia, ethnovillages serve as modern "guardians" of Serbian traditions, allowing tourists to engage with local authentic crafts, culinary practices, and the atmosphere of traditional rural life [16].

While open-air museums and ethnovillages serve similar goals of preserving and promoting cultural heritage – particularly architectural and intangible – the main difference lies in their form of ownership. Most ethnovillages are created through private initiatives, which determines their classification as privately owned entities. According to the author, this form of ownership largely shapes the core aspects of their activity: ethnovillages are not just exhibition spaces, but environments where cultural heritage preservation is integrated with entrepreneurship (e.g., job creation for local residents, residential or functional use of traditional buildings). This kind of activity exemplifies the synergy between ethnographic, rural, and museum-based tourism, as previously discussed by the author.

At the same time, most existing studies are predominantly theoretical and methodological or descriptive and generalizing in nature. The functioning of ethnographic complexes under crisis conditions – particularly in the de-occupied territories of Ukraine during the full-scale war – remains insufficiently studied. These specific aspects of the stated problem are addressed in this article through the analysis of a concrete case – the "Sokolynyi Khutir" ethnographic complex in Chernihiv Oblast.

Unresolved aspects of the general problem that the article addresses. Despite the considerable volume of theoretical and applied research on the development of ethnographic and rural green tourism, as well as the functioning of open-air museum spaces, the scholarly discourse still lacks comprehensive analysis of how ethnographic complexes operate in the context of post-war recovery within de-occupied territories of Ukraine. Particularly relevant is the absence of an integrated vision of how such multifunctional entities (exhibition, tourism, cultural, and entrepreneurial in nature) can contribute to the sustainable development of local communities under today's socio-economic realities.

Moreover, the scientific literature has not sufficiently addressed the effectiveness of privately-owned ethnographic complexes in preserving cultural heritage, especially those operating under the challenging conditions of wartime. There is a clear lack of empirical studies based on specific case examples from de-occupied territories, where tourism activity is not only being restored, but also contributes to shaping a new paradigm of local development.

This article seeks to fill this academic gap thro-

ugh an in-depth analysis of the functioning of the "Sokolynyi Khutir" ethnographic complex in Chernihiv Oblast as an example of the synergy between ethnographic, rural, and museum tourism, which is actively integrated into the processes of recovery and cultural revitalization of communities.

Methods. A range of research methods was employed to achieve the purpose of the study: analysis and synthesis for revealing the peculiarities of the development of rural green tourism and ethnographic complexes under martial law conditions; statistical data of the State Agency for Tourism Development of Ukraine, Chernihiv Regional State Administration, and local territorial communities for assessing the dynamics of tourism development in the region; the case study method for determining the specifics of sustainable development of the local community thanks to "Sokolynyi Khutir" ethnographic complex; SWOT analysis for identifying ethnographic complex strengths, weaknesses, opportunities, and threats in the current socio-economic context.

Research Results. In the context of the restoration of tourism activities in the territories deoccupied from Russian invaders, it is appropriate to address the Chernihiv region experience and its ethno-cultural potential, as it remains in demand among domestic and foreign tourists even during wartime. As of January 1, 2025, the region has 44 hotel establishments, 25 rural tourism estates, and 28 recreation centers and tourist complexes. These figures have increased by more than 30% compared to 2023, which indicates a positive dynamic in the development of the tourism business in the Chernihiv region under martial law. The increase is also confirmed by the volume of revenues to the state and local budgets from the financial and economic activities of legal entities and individual entrepreneurs in the tourism sector in the Chernihiv region: in 2024, they amounted to UAH 17.13 million, which is 53% more compared to 2023 (UAH 11.18 million). This indicator almost reached the value of 2021 (UAH 18.9 million) – the period before the full-scale invasion of Ukraine by the Russian military [17].

In 2024, the tourist destinations of the studied region were visited by 424.180 people, which is almost 65.000 more than in 2023 (359.260 people). The volume of revenues from the tourist tax to the budgets of region territorial communities in 2024 amounted to UAH 1.64 million, which is 9% more than in 2023 (UAH 1.5 million) [17].

In the pre-war period ethnographic complexes and centers of rural green tourism were actively formed and developed in the Chernihiv region. Their activities positively influenced the process of preserving cultural heritage sites, the revival and development of folk crafts and traditional industries. At the same time, they made a significant contribution to the development of territorial communities, increasing revenues to their budgets. However, due to the impact of the COVID-19 pandemic and the full-scale Russian aggression there was traced a negative trend of decreasing their number: in 2024, there were 25 rural green tourism estates operating in the Chernihiv region, while in 2019 there were 36 [17].

Yet, some ethnographic complexes and centers of rural green tourism in the Chernihiv region stayed rather successful. One of them is "Sokolynyi Khutir". The conceptual principles of its activity are familiarization with the history and culture of Ukraine, the traditional way of life of the Ukrainian village, and folk crafts. The cultural attractions of the complex are very diverse, which is why it is also called an ethnographic museum space.

The owner of the complex is a native of the region, Mykola Cherep. He is a well-known figure in the region, as his activities cover a wide range of areas. In particular, the founder of "Sokolynyi Khutir" is a deputy of the Village Council, a successful entrepreneur, a public figure, a photographer, and a local historian. At the end of the 1990-ies Mykola bought several abandoned rural estates in the village of Petrushivka, restored and furnished them in the style of a Ukrainian village of the second half of the 19th century. The ethnographic complex began serving its first visitors in 2000.

Currently, 13 estates are located on the territory of the complex, six of them are adapted for guest accommodation. Their capacity ranges from two to eight people. It is noteworthy that each dwelling has its own authentic style, which is about 100-150 years old. In the owner's words, the average length of visitors' stay in the estates is two days, usually on weekends. Less often, tourists stay in the ethnographic complex for three to seven days. The highest occupancy rate of these accommodation facilities occurs from May to early November [18].

Over almost 25 years of ethno-complex operation, it has already been visited by tourists from 35 countries around the world: Poland, Germany, Czech Republic, France, Belgium, Great Britain, Sweden, Lithuania, USA, Japan, etc. Table 1 illustrates the dynamics of visits over the past seven years, representing different categories of visitors and their territorial affiliation.

In relation to the principles and content of its activities, the "Sokolynyi Khutir" ethnographic complex correlates with European ethno-villages. The directions of its activity were characterized in accordance with the concept of sustainable development, which includes three main components: economic, social, and environmental. The expediency of using this concept can be justified by the 2030 Agenda for Sustainable Development [20]. In view

Table 1

Dynamics of the Tourist and Excursion Flow of "Sokolynyi Khutir"

Category	Years						
	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Total Number of Tourists (persons)	4.265	3.815	2.505	1.816	327	1.070	1.512
Number of Excursionists, who ordered lunch (persons)	1.053	419	321	207	111	318	611
Proportion of Visitors from Chernihiv Region (persons)	803	330	408	254	410	613	924
Number of Foreign Tourists (persons)	150	30	5	7	2	1	4

Source: Created by the author on the basis on [18; 19].

of this, the author conducted a comprehensive analysis of the ethnographic complex "Sokolynyi Khutir" activities aimed at the sustainable development of the local community (Fig. 1).

Economic Component. Its cornerstone is the strengthening of local entrepreneurship, which manifests itself through the implementation of various activities. Consequently, one of the most important is the creation of jobs, that is, providing local residents with employment opportunities in the service sector. In the village of Petrushivka, which is part of the Parafiivka territorial community, there are two employers, one of which is the "Sokolynyi Khutir" ethnographic complex. As of January 1, 2025, there lived 157 residents in the village, of which 94 were of working age and only 30 people were employed. According to the author's calculations, the unemployment rate reaches 68%. This indicator is one of the lowest compared to other settlements of the territorial community [21].

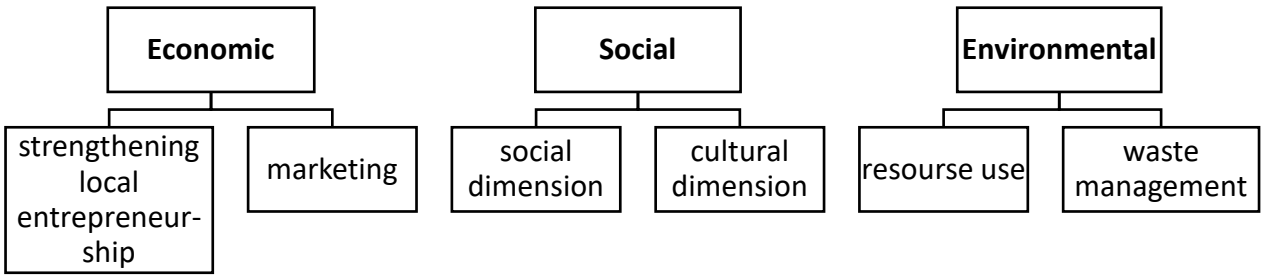


Fig. 1. Sustainable development structure by the ethnographic complex "Sokolynyi Khutir".
Source: Developed by the author.

"Sokolynyi Khutir" mainly employs members of the owner's family. However, during the high season – from May to mid-November – the ethnographic complex hires workers from local residents, usually up 7 people.

The next factor determining the economic component is the support of local entrepreneurs. When visiting ethnographic centers, tourists actively consume locally produced goods and services, contributing to the development of local businesses. In this context, "Sokolynyi Khutir" has a sufficiently diversified range of goods and services to offer:

- the family cuisine tavern uses only environmentally friendly products grown specifically for the ethnographic complex by fellow villagers;
- the ethnographic complex offers only natural craft products: honey, herbal and berry teas, the raw materials for which are personally collected and prepared by the owner of the center, honey wine, and other alcoholic beverages;
- production of tourist and excursion products (trips, hikes, excursions, local history expeditions, etc.);
- minting of commemorative coins, etc.

An important indicator of the economic component of sustainable development for this ethnographic complex is marketing, aimed at visitor acquisition and promotion of the region where it operates. The main tools for promoting the "Sokolynyi Khutir" product are digital platforms and social media that allow for effective dissemination of information about it. The complex predominantly uses

the following tools: maintaining its own website, managing social media, and the Google Maps platform. This allows for increasing its recognition at both regional and national levels, ensuring the attraction of new visitors, and strengthening its position in the tourism market.

Social Component is assessed through two dimensions – social and cultural. The social dimension involves ensuring the integration of the local territorial community, increasing its social cohesion, and supporting cultural diversity. It has several manifestations in the context of "Sokolynyi Khutir" activities. One of them is the development of identity for settlements and territorial communities. The owner of the ethnographic complex participated in two such projects: in 2023, the coat of arms and flag for the settlement of Parafiivka, which are simultaneously representative symbols of the Parafiivka territorial community, were developed and approved; in 2024, symbols were created for the village of Kruty [21, 23].

In the difficult wartime conditions, the problem of people's social protection has become extremely relevant. As a deputy of the Village Council, Mykola Cherep participates in the survey of the living conditions of local residents and internally displaced persons, people with disabilities, provides them with various types of assistance: financial, medicines, food, clothing, fuel, etc. During the temporary occupation of the Parafiivka local community territory by Russian troops and their retreat (March-April 2022), the owner of "Sokolynyi Khutir", together with local residents, created a voluntary formation that patrolled round-the-clock to identify occupiers lagging behind their units in woods, ravines, and swamps between the villages of Vlasivka-Kachanivka-Ivanytsia, Vlasivka-Petrushivka-Parafiivka [18].

In March 2023, Cherep reported to representatives of the OSCE (Organization for Security and Co-operation in Europe) in Kyiv on the routes of Russian military columns moving through the territory of the local community during their invasion and retreat. He provided photographic evidence of military actions and the consequences suffered by the villages of the Parafiivka local community. Since October 2023, cooperation has begun with the Public Union "Educational Human Rights House in Chernihiv", one of the areas of which is the documentation of crimes committed by the Russian military [18].

To commemorate the 1000th anniversary of the founding of the Chernihiv Principality, a number of national projects were initiated, and Mykola Cherep co-organized several of them. In particular, he actively worked on the educational projects "Unbreakable Ukraine and Europe" and "Unbreakable Ukraine: From Ancient Times to the Present Day". In addition, a number of thematic tourist and excursion routes were developed for the Chernihiv region [19].

The cultural activities of the "Sokolynyi Khutir" complex are multi-vectoral. First of all, they involve the organization of events aimed primarily at the preservation and popularization of national historical and cultural heritage. A number of historical and cultural attractions have been established on the territory of the ethnographic complex, allowing visitors to feel the strength of the national spirit and their deep ancestral roots. Among them are:

- Historical and Ethnographic Museum, which presents 32 folk crafts, including cartwrighting, pottery, glassmaking, icon painting, weaving, wickerwork, pysanka (decorated Easter egg) painting, beekeeping, etc.;
- Museum of the History of Liberation Struggles in the Chernihiv Region, which represents rare examples of firearms and edged weapons of the Zaporizhian Sich and the period of national liberation struggles of the 20th century, military uniforms, etc.;
- Open-air Museum "Time Machine", which exhibits agricultural implements, motorcycles, and automobiles of various times from the 1940s to the present day;
- Taras Shevchenko Art Gallery, which displays paintings by Ukrainian artists, including plein air paintings created directly in Sokolynyi Khutir;
- Mint Museum, where the owner of the ethnographic complex personally mints commemorative coins dedicated to the history and prominent figures of Ukraine;
- Equestrian Stunt Theater, where theatrical performances are regularly held.

Another important cultural activity is the organization of thematic photo exhibitions by the owner. One such socio-cultural event was the exhibition project "By the Road of Impressions/Wounds", the purpose of which is to preserve the people's memory of the full-scale invasion of Russian aggressors into Ukraine, highlighting the events experienced by the local communities of Pryluky and Nizhyn districts of the Chernihiv region during the 37 days of occupation. Within the framework of the project (March 2023 - November 2024), five exhibitions were held in the villages of Dmytrivka, Parafiivka, Bakhmach, Borzna, and Kachanivka. They were visited by over 23000 people. During each exhibition, charity auctions were organized, as well as the sale of numismatic products certified by the "Sokolynyi Khutir" mint and photographs taken by the initiator and organizer of the project. The proceeds, amounting to UAH 36.200, were directed to the needs of the Armed Forces of Ukraine [18].

The photo exhibition “Following Taras's Paths. From Kachanivka to Washington” has gained a wide popularity both in Ukraine and abroad. It is dedicated to the Ukrainian genius Taras Shevchenko. The exhibition includes 62 photographs taken in pre-war times, showing the park and garden architecture and impressive landscapes of the National Historical and Cultural Reserve “Kachanivka”. This photo exhibition was first presented to the public in 2022, on the eve of the armed Russian aggression, when it was showcased on the occasion of the 250th anniversary of the Kachanivka estate's founding. And already in the autumn of 2022, part of the works was exhibited in the Capitole building in Rochechouart (France). From February 27 to March 17, 2023, with the support of the Ukrainian House in Washington the Ukrainian diaspora, and soldiers of the Armed Forces of Ukraine who were undergoing rehabilitation in American hospitals became acquainted with the exhibition [19].

The ethnographic complex activities are widely represented in various projects at the regional, national, and even international levels. Thus, “Sokolynyi Khutir”, together with the Cherkasy Regional Museum of Local History, craftswomen of the Cherkasy regional center of the “National Union of Folk Art Masters of Ukraine”, and other public organizations, implemented the project “Drawing Victory. The Power of the Rushnyk (embroidered towel) Tree of Life”. Its goal was to popularize Ukrainian folk customs and traditions [19].

Another noteworthy international project is “100 Motankas for Peace”, implemented in the summer of 2023. It was a series of cultural charity exhibitions held in Japan and Ukraine. The project was aimed at cultural exchange between the countries. It included exhibitions, master classes in making motankas (traditional Ukrainian dolls) in Japan and origami in Ukraine, and art therapy for children living in temporary shelters for Ukrainian refugees. Thus, the Parafiivka territorial community was represented at the exhibition by an author's motanka doll created by master Natalia Chub and commemorative coins from the “Sokolynyi Khutir” mint [19].

In addition, it is appropriate to note the interaction of the ethnographic complex with educational institutions. This cooperation is aimed at arranging educational activities among students, popularizing local traditions and customs, and fostering interest and respect for the historical past. The complex has had friendly relations for many years with the Ivan Franko Pryluky Humanitarian and Pedagogical College, the “KROK” University of Economics and Law (Kyiv), the National University of Ukraine on Physical Education and Sport, and others. Thus, systematic joint implementation of cultural and social events, educational meetings on the territory of the ethnographic complex, and educational activities help to form in young people a spirit of patriotism and interest in the historical and cultural heritage of their native land are carried out on an ongoing basis.

Environmental Component. Adherence to the environmental balance within this component ensures the preservation of the environment, the rational use of natural resources, and the minimization of the impact of human activity on the ecosystem of the territorial community. Based on the functioning of the complex, this component acquires a particular importance, as it leads to an increase in the tourist attractiveness of the territorial community, shaping its image as a destination for environmentally responsible recreation. The environmental component should be characterized by two dimensions – the use of natural resources and waste management.

The activities of “Sokolynyi Khutir” are based on the principles of rational environmental management. Its main aspects are a wise use of natural resources, namely:

1. Land resources. These are the plots where the infrastructure of the ethnographic complex is located, their total area is 4.8 hectares. The owner uses only ecological farming methods to ensure the necessary conditions for environmental management, completely abandoning chemical fertilizers.

2. Water resources. The village of Petrushivka, where the ethnographic complex operates, is located on the banks of a series of ponds. “Sokolynyi Khutir” itself is located on the bank of the Smozh River, which is a backwater of these ponds. The ethnographic complex offers various tourist services, including boat and catamaran rides, recreation on an equipped beach, fishing, etc. At the same time, water use standards are observed here, avoiding water pollution.

3. Forest resources. There are numerous forest plantations near the ethnographic complex. They are the place for hiking and trekking for tourists, as well as for gathering mushrooms, berries, etc. “Sokolynyi Khutir” uses these resources rationally, maximizing the preservation of biodiversity.

The Chernihiv region is rich in unique flora and fauna, which also represents significant tourist value. Therefore, first of all, the organization of environmentally safe wildlife observation and informing tourists about the importance of ecosystem preservation are priorities in the activities of “Sokolynyi Khutir”. It should be noted that a local ecocide has recently occurred near the ethnographic complex. A lot of beavers settled on the territory of the National Historical and Cultural Reserve “Kachanivka” in 2008, and now their population numbers hundreds of individuals. In 2023-2024, their activity became rather excessive, and they destroyed over 300 trees of valuable species, the age of which numbers many

hundreds of years. Mykola Cherep repeatedly raised this issue at the at the local and state levels, emphasizing that it was human incompetence and irresponsibility of government officials that caused the destruction of unique trees that represented national value [18].

Waste management is another important criterion of the environmental component of sustainable development. It plays a significant role in the life of the "Sokolynyi Khutir" complex. Its main aspects are:

1. Waste sorting. Containers for separate waste collection are installed on the territory of the ethnographic complex. This allows for organizing and submitting waste for recycling or composting, reducing its negative impact on the environment.

2. Waste prevention. The "Sokolynyi Khutir" team is working to reduce waste generation. This includes various activities, in particular the use of reusable dishes, avoidance of disposable goods, and reduction of packaging for craft products from local entrepreneurs.

Thus, having analyzed the activities of the "Sokolynyi Khutir" from the concept of sustainable development view, it can be concluded that the ethnographic complex has achieved the most significant results precisely in ensuring its social component. In this context, many projects and events are being implemented aimed at popularizing historical and cultural heritage, highlighting the ethnic peculiarities of the region, traditions, customs, and crafts of the local population. The owner of the complex adheres to the idea that historical and cultural heritage is one of the main tourist resources that needs to be preserved, revived, and developed. This is confirmed by Mykola Cherep's life motto: "The history, culture, traditions, and spirituality of the native land are the eternity of the Ukrainian people, which must be glorified" [19].

In order to obtain an objective picture of the "Sokolynyi Khutir" operation and its impact on local community's sustainable development, the author conducted a SWOT analysis (Table 2) which helped to identify the ethnographic complex strengths, weaknesses, opportunities, and threats in the current socio-economic context.

The conducted SWOT analysis indicates that the studied ethnographic complex, despite a number of contemporary problems and threats, functions and continues to produce a demanded and competitive tourist and excursion product, and has significant resource potential for diversifying its activities. At the same time, in the author's opinion, the full-fledged multi-vectoral development of "Sokolynyi Khutir" will become possible in the post-war period.

Conclusions

As a result of the conducted research, the author states that rural green, ethnographic, and museum tourism closely interact in the context of socio-economic development of regions and territorial communities, preservation of the natural environment, and familiarization of a wide range of tourists and excursionists with historical and cultural heritage, folk crafts, traditions, and customs. The synergy

Table 2

SWOT Analysis of the Development of the "Sokolynyi Khutir" Ethnographic Complex.
Source: Developed by the author

STRENGTHS	WEAKNESSES
- favorable geographical location - clean and attractive natural environment: Ichyanskyi National Nature Park, Trostyanets Dendropark, and over 20 other nature reserves, sufficient water resources and significant reserves of drinking water, absence of large polluting enterprises. - possibility of using territories under state protection (reserves, dendroparks). - rich historical and cultural heritage, a wide range of tourist attractions. - authenticity and unique cultural and ethnographic experience: preserved rural traditions, crafts, rituals, peasant hospitality; preparation of national cuisine dishes. - affordable prices for accommodation and meals. - relatively lower risks of missile and bomb attacks.	- low income of the population. - insufficient level of social infrastructure in rural areas. - aging rural population. - dependence on seasonal demand. - insufficient level of employee qualifications. - lack of investment capital. - insufficient awareness among the target audience. - underdeveloped system for booking and distributing services via the Internet. - tangible consequences of Russian military aggression: destruction and damage to over 250 objects in 10 settlements, insufficient number of shelters. - complicated logistics, delays in the delivery of products, goods, and services. - changes in the directions and numbers of tourist and excursion flows. - security risks for tourists. - lack of state support for the development of rural green tourism under martial law.

Continuation of Table 2

OPPORTUNITIES	THREATS
- development of small and medium-sized enterprises in the territorial community and creation of new jobs. - promoting the development of social infrastructure in rural areas. - increasing the investment attractiveness of the ethnographic complex. - expanding cooperation with Ukrainian and foreign partners, attracting domestic and foreign tourists in the post-war period. - development of information and communication technologies: the spread of artificial intelligence, further digitalization of the tourism sector. - grant support for representatives of the tourism business, provision of state and international assistance after the termination of martial law. - creation of new tourist and excursion routes with proper security measures. - diversification of the tourist offer (military-historical, memorial, event, adaptive tourism, and others).	- continuation of the full-scale Russian military aggression: increase in the number of mobilized individuals, combatants, decrease in the working-age population, blackouts, infrastructure destruction. - aggravation of the demographic crisis in Ukraine: outflow of population, increase in mortality, decrease in birth rate. - further increase in the cost of energy resources: rise in fuel prices, electricity and gas tariffs, proportional increase in the cost of goods and services. - destruction and damage to historical and cultural heritage sites. - decrease in demand for tourist and excursion products due to uncertainty in security guarantees. - inaccessibility of services for a wide range of people, including people with special needs, their family members, guardians, as well as elderly people. - lack of trained personnel for inclusive tourism. - tough competition from similar complexes and rural green tourism centers in other regions of Ukraine.

of these types of tourism within the framework of "Sokolynyi Khutir" ethnographic complex opens up prospects for its functioning as a significant tourist and cultural center of the Chernihiv region, a powerful factor in the economic development of the local community, the preservation, protection, and popularization of national heritage, the raising of morale, and the support of social cohesion in the conditions of martial law and post-war recovery.

The results of the research can be used by local governments and entrepreneurs to develop strategies for sustainable development of local rural communities through the support of ethnographic tourism and ethnographic complexes, in particular. The conducted SWOT analysis allows for outlining specific areas for strengthening the competitiveness of rural tourism facilities in the conditions of the war and post-war period.

Bibliography

1. *Державне агентство розвитку туризму України (ДАРТ). У 2024 році туристична сфера України принесла в бюджет майже 3 млрд грн.* https://www.tourism.gov.ua/blog/u-2024-turistichna-sfera-ukrayini-prinesla-v-byudzhet-mayzhe-3-mlrd-grn
2. *Smith, V. L. (1989). Hosts and guests: The anthropology of tourism (2nd ed.). University of Pennsylvania Press.*
3. *Graburn, N. H. H. (1983). The anthropology of tourism. Pergamon Press.*
4. *Harron, S., & Weiler, B. (1992). Ethnic tourism. In B. Weiler & C. M. Hall (Eds.), Special interest tourism (83–94). Belhaven Press.*
5. *Butler, R. (1996). Tourism and indigenous peoples. ITBP.*
6. *Richards, G. (1996). Cultural tourism in Europe. CABI Publishing.*
7. *Goeldner, C. R., & Ritchie, J. R. B. (2011). Tourism: Principles, practices, philosophies (12th ed.). Wiley.*
8. *Wang, Y., Shen, H., Yea, S., & Zhou, L. (2020). Being rational and emotional: An integrated model of residents' support of ethnic tourism development. Journal of Hospitality and Tourism Management, 44, 112–121.* https://doi.org/10.1016/j.jhtm.2020.05.008
9. *Rinzing Lama, & Sarkhel, D. (2022). Ethnic tourism. In D. Buhalis (Ed.), Encyclopedia of tourism management and marketing (1: 122–124). Edward Elgar Publishing.* https://doi.org/10.4337/9781800377486
10. *Yang, L., & Wall, G. (2023). Ethnic tourism: Impacts, challenges and opportunities. Routledge.*
11. *Мелько Л. (2003). Етнографічний туризм як складова культурно-пізнавального туризму. Туризм у контексті сучасного виміру: Зб. наук. пр. Київ, 61-65.*
12. *Устименко Л. М. (2011). Основи туризмознавства: навчальний посібник. 2-ге вид., перероб. і доп. К.: Альтерпрес, 345.*
13. *Дутчак О. (2013). Теоретико-методологічні проблеми українського етнотуризму: історіографія. Вісник Прикарпатського університету. Історія. 23–24: 318-322.*

14. Гаврилюк А. (2013). Сучасний розвиток українського етнотуризму: зміна парадигми. Науковий вісник Чернівецького університету. 665: 56-61.
15. Голод А. П., Мисяк О. М. (2015). Етнічний туризм в Карпатському регіоні: структурні особливості та проблеми розвитку. Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія: Економічні науки. 15(1): 85-87.
16. Čiča, Z., & Mlinar, A. (2010). Etno-sela između očuvanja identiteta i poduzetničkog trenda. Etnološka Tribina. 40(1): 117–128.
17. Департамент культури, і туризму, національностей та релігій Чернігівської ОДА: офіційний сайт. https://dkult.cg.gov.ua/
18. Домашній архів М. Черепа (2024). Повідомлення депутата від виборчого округу №1 Черепа Миколи Миколайовича про роботу в раді. С. 2.
19. Микола Череп (2025). Сторінка у соціальній мережі Facebook. https://www.facebook.com/mikola.cerep.276743/
20. UNDP (2018). Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. https://www.undp.org/uk/ukraine/publications/peretvorennya-nashoho-svitu-poryadok-dennyy-u-sferi-staloho-rozvytku-do-2030-roku
21. Парафіївська селищна рада (2025). Чернігівська область, Прилуцький район. https://parafiivska-sr.gov.ua/
22. Соколиний хутір: сайт. URL: https://sokoliniyhutir.com.ua/
23. Крутівська громада. Чернігівська область, Ніжинський район. https://kruty-gromada.gov.ua/

References

1. State Agency for Tourism Development of Ukraine (SATD). In 2024, Ukraine's tourism sector contributed almost 3 billion UAH to the state budget. URL: https://www.tourism.gov.ua/blog/u-2024-turistichna-sfera-ukrayini-prinesla-v-byudzhet-mayzhe-3-mlrd-grn [in Ukrainian]
2. Smith, V. L. (1989). Hosts and guests: The anthropology of tourism (2nd ed.). University of Pennsylvania Press.
3. Graburn, N. H. H. (1983). The anthropology of tourism. Pergamon Press.
4. Harron, S., & Weiler, B. (1992). Special Interest Tourism. Review: Ethnic tourism. London: Belhaven Press, 83-94.
5. Butler, R. (1996). Tourism and indigenous peoples. ITBP.
6. Richards, G. (1996). Cultural tourism in Europe. CABI Publishing.
7. Goeldner, C. R., & Ritchie, J. R. (2011). Tourism: principles, practices, philosophies. Eleventh ed. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
8. Wang, Y., Shen, H., Yea, S., & Zhou, L. (2020). Being rational and emotional: An integrated model of residents' support of ethnic tourism development. Journal of Hospitality and Tourism Management, 44, 112-121. https://doi.org/10.1016/j.jhtm.2020.05.008
9. Rinzing Lama, & Sarkhel, D. (2022). Ethnic tourism. In D. Buhalis (Ed.), Encyclopedia of tourism management and marketing, 1, 122–124. Edward Elgar Publishing. https://doi.org/10.4337/9781800377486
10. Yang, L., & Wall, G. (2023). Ethnic tourism: Impacts, challenges and opportunities. Routledge.
11. Melko, L. (2003). Ethnographic tourism as a component of cultural and educational tourism. Tourism in the Context of the Modern Dimension: Collection of Scientific Works, Kyiv, 61-65. [in Ukrainian]
12. Ustymenko, L. M. (2011). Fundamentals of Tourism Studies: Textbook (2nd ed., revised and supplemented). Kyiv: Alterpres, 345. [in Ukrainian]
13. Dutchak, O. (2013). Theoretical and methodological problems of Ukrainian ethnic tourism: historiography. Bulletin of the Precarpathian University. History, 23-24, 318-322. [in Ukrainian]
14. Havryliuk, A. (2013). Modern development of Ukrainian ethnic tourism: paradigm shift. Scientific Bulletin of Chernivtsi University, 665, 56-61. [in Ukrainian]
15. Holod, A. P., & Mysiak, O. M. (2015). Ethnic tourism in the Carpathian region: structural features and development problems. Scientific Bulletin of Kherson State University. Series: Economic Sciences, 15(1), 85-87. [in Ukrainian]
16. Čiča, Z., & Mlinar, A. (2010). Ethno-villages between the preservation of identity and the entrepreneurial trend. Etnološka Tribina, 40(1), 117-128. [in Croatian]
17. Department of Culture, Tourism, Nationalities and Religions of Chernihiv Regional State Administration. (n.d.). Official website. URL: https://dkult.cg.gov.ua/ [in Ukrainian]
18. Cherep, M. (2024). Report of the deputy of electoral district No. 1 on work in the council. Private archive, 2. [in Ukrainian]
19. Cherep, M. Facebook page. URL: https://www.facebook.com/mikola.cerep.276743/ [in Ukrainian]
20. UNDP (2018). Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. URL: https://www.undp.org/uk/ukraine/publications/peretvorennya-nashoho-svitu-poryadok-dennyy-u-sferi-staloho-rozvytku-do-2030-roku
21. Parafiivska Settlement Council. Chernihiv Region, Pryluky District. Retrieved from: https://parafiivska-sr.gov.ua/ [in Ukrainian]
22. Sokolynyi Khutir. Official website. URL: https://sokoliniyhutir.com.ua/ [in Ukrainian]
23. Krutivska Community. Chernihiv Region, Nizhyn District. URL: https://kruty-gromada.gov.ua/ [in Ukrainian]

Етнографічні комплекси як каталізатори регіонального розвитку: досвід Чернігівської області

Анастасія Макеєва
аспірантка кафедри країнознавства та туризму,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Відбудова поруйнованої російськими агресорами суспільної інфраструктури, відновлення політичної, соціально-економічної та культурної активності на деокупованих територіях є нагальною потребою сталого розвитку регіонів і територіальних громад. У зазначеному контексті потужним рушієм розвитку місцевих громад може та має стати туристично-екскурсійна діяльність, зокрема така її органічна складова як етнографічний туризм. Актуалізується потреба у комплексному дослідженні функціонування етнографічних туристичних комплексів в умовах воєнного стану, їх фінансово-організаційного потенціалу як осередків місцевого підприємництва, збереження історико-культурної спадщини, посилення соціальної згуртованості та повоєнного розвитку громад. Метою дослідження є вивчення ролі етнотуристичних комплексів у сталому соціально-економічному розвитку територіальних громад на деокупованих територіях. Об'єктом дослідження є етнографічний комплекс «Соколиний хутір» як чинник збереження історико-культурної спадщини, розвитку туризму та краєзнавчої діяльності, а також стимулювання місцевого підприємництва. Предметом дослідження є діяльність суб'єктів етнографічного туризму на деокупованих територіях в умовах воєнного стану. Для реалізації мети використано поєднання якісних і кількісних методів: аналіз і синтез, статистичні методи, кейс-стаді та SWOT-аналіз. Проведений аналіз засвідчив, що «Соколиний хутір» функціонує як багатовекторний туристично-культурний комплекс, що поєднує етнографічну, музейну та підприємницьку діяльність. Зазначений комплекс забезпечує робочі місця, підтримує місцеве самоврядування, розвиває культурну ідентичність територіальної громади, сприяє збереженню та популяризації матеріальної та нематеріальної спадщини. Вперше здійснено комплексне дослідження діяльності приватного етнотуристичного комплексу в умовах воєнного стану з позиції оцінки критеріїв сталого розвитку. Проаналізовано ефективність культурно-підприємницьких практик у збереженні національної спадщини та підвищенні соціальної стабільності у територіальних громадах.

Ключові слова*: сталість, соціально-економічний розвиток, територіальна громада, етнографічний комплекс, туризм, музейний простір, етно-село, етнографічний туризм, музеї просто неба.*

Надійшла 27 червня 2025 р.
Прийнята 23 жовтня 2025 р.

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-20
UDC 551.311.8;624.131.5
Received 14 May 2025
Accepted 30 September 2025

Characteristics of mudflow occurrence and the study of mudflow deposits in the Azerbaijani part of the Greater Caucasus mountain

Juma Mamedov [1]
PhD (Geography), Associate Professor, Leading Researcher,
[1] Ministry of Science and Education of Azerbaijan, Institute of Geography, Baku, Azerbaijan,
e-mail: jumamamedov@yahoo.com, https://orcid.org/0009-0005-3033-8517;
Agil Hajiyev [2]
PhD student, Senior Lecturer,
[2] National Aviation Academy, Azerbaijan Airlines JSC, Baku, Azerbaijan,
e-mail: haciyev_1978@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-1159-3242;
Mahammad Guliyev [3]
PhD (Geography), Lecturer,
[3] Nakhchivan State University, Nakhchivan, Azerbaijan,
e-mail: m.quliyev.ordubad92@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-3858-1004

ABSTRACT

Problem definition. In recent years, a series of hydrological observations of the studied area show that mudflows not only weaken, but also in a number of regions where mudflows were not previously noted, began to manifest themselves in an active form. This is explained by the fact that in recent years, the detection of mudflows has increased the saturation of emissions of mixed chemical waste into the lower layers of the atmosphere, associated with military actions in the southwestern part of Eurasia, as well as between Russia and Ukraine. Incoming winds to the territory of Azerbaijan from west with chemical waste, pollute air masses compared to the northern ones. In the troposphere, the radiation balance is increased, which pollutes it and, as a result, the ecological balance is disturbed and affects the passage of mudflows along the Greater Caucasus.

The purpose of the study. The aim of the study is to analyze the distribution of mudflows taking into account the regional specifics of the Greater Caucasus and the natural factors influencing them, causing the formation of mudflows. The rivers of the territory under consideration are generally characterized by the prevalence of all types of mudflows compared to other areas. Mudflows of rivers of the southern slope of the Greater Caucasus are special.

Methodology of the study. While performing this study, mainly geographic-hydrological and comparative methods, as well as the analysis of expedition data and their hydrological monitoring were used. Hydrological data are almost the only objective source for judging the formation of mudflows. Therefore, the initial material for this study was the data of stationary observations of the largest discharges of suspended sediments, as well as the results of field expeditionary studies.

Discussion of results. It was determined that mudflows, along with changes in synoptic processes and the intensity of daily precipitation, depend on the direction of highlands to lowlands and vice versa, their precipitation. For these reasons, with the same rainfall, in the first case, mudflows occur on rivers, and in the second case river floods. This is explained in the first case by a sufficient, and in the second case, insufficient amount of weathering products from surface washout.

Conclusion. It was determined that in the belt section, especially formed by strong mudflows, the lithological relationship of differentiation of weathering products, forming the cone deltas, clearly appears. In the nearest foots of the lowlands to the piedmonts in parts of the cone delta, the section almost entirely consists of coarse-grained material with ripple-wake suspensions, with gravel and coarse sands. As moving away from the piedmont plain to the plain, the presence of sloping sands is observed, which are presented in the section of dry deltas and cause water strikes flows. Similar is observed on the cone deltas of the Talachay, Naibbulag rivers, on the cone deltas near the village of Suvagil where water strikes on the surface of the land.

Keywords*: mudflow, riverbed, debris flow, erosion, sediment transport, suspended load, exogenous process, heavy rain.*

In cites: Mamedov Juma, Hajiyev Agil, Guliyev Mahammad (2025). Characteristics of mudflow occurrence and the study of mudflow deposits in the Azerbaijani part of the Greater Caucasus mountain. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 266-277. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-20

Problem definition. In areas with high mountainous relief, the activity of the river network, as well as the amount and type of annual runoff, is characterized by complex dynamics. Although the water regime of these rivers is more stable in winter, with the onset of snowmelt in early spring the beginning of the high-water period occurs, and with the increase in precipitation this runoff may transform into floods and mudflows [1]. In river basins with an impulsive runoff regime, precipitation starting from mid-spring turns into mudflows because infiltration in the upper layers of water-saturated soils is delayed. The accumulation of water on the surface flows down steep and highly inclined slopes, thereby conditioning the formation of mudflows [8]. In the Azerbaijani part of the Greater Caucasus mountains, there are a considerable number of river systems with such a regime [25]. The highest peak of this mountain system within the territory of Azerbaijan is Bazarduzu (4466 m). In the high-altitude belt of the mountainous area, permanent glaciers are present (Bazarduzu, Tufan, Shahdag, Qavdanvas,

© *Mamedov Juma, Hajiyev Agil, Guliyev Mahammad, 2025*

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Yatigdara, etc.) [5, 7]. Mudflow is characterized by its high velocity and transport capacity, the movement of stones, gravel, soil, mud, and large boulders together with water, its sudden occurrence, and its highly destructive power [23].

As an exogenous process, the mudflow phenomenon is uncontrolled both abroad and in our country, often assuming a catastrophic character, causing severe damage to the economy, regional centers, and villages, leading to human fatalities and the contamination of drinking water [20]. At present, taking into account the influence of climate change, the study of flood and mudflow events is of particular importance [21].

For the study of mudflow events, it is necessary to measure the maximum discharges of water and suspended sediments, to identify the regularities of mudflow hydrodynamics, to determine the characteristics of mudflow deposits, their granulometric composition, the volume of mudflow material, the zoning of mudflow deposits, and to develop a scientifically detailed classification of mudflow events. Therefore, the study of mudflow phenomena requires interaction with the parameters of natural factors.

Chen et al. noted that, in order to demonstrate the destructiveness of mudflows, often only the impulse carried by the distinct wave front is used. The researcher classified the erosion pattern into two types (surface erosion and deep erosion). For wave flows accompanied by erosion–deposition distribution, significant downstream erosion potential was confirmed, and the erosion caused by the mudflow wave was evaluated as deep erosion [2].

In recent years, global warming observed on Earth has led to spatio-temporal shifts in precipitation in the Greater Caucasus region. Snowfall occurring during the cold season melts rapidly due to short-term warming of the air. In mountainous regions, the increase in recurrence of maximum precipitation of torrential character has resulted in the formation of mudflows and an increase in their frequency [4].

After a mudflow event, chaotically fragmented material accumulates on the surface of river basins. The accumulated sediment material should be considered as a source for the subsequent occurrence of mudflow events. The main mudflow events occur in the river basins carrying mudflows on the southern slopes of the Greater Caucasus [18].

In recent years, global warming has had a particular impact on the formation of mudflow events. Unfortunately, due to prolonged dry summers (with relative humidity down to 40 %) and sharp diurnal fluctuations of air temperature, rock weathering has intensified, leading to the accumulation of fragmented material along mountain slopes [6]. The necessary conditions for the occurrence of mudflow events include the predominance of xerophytic vegetation with anti-erosion properties, the rapid burning and disappearance of grass cover, intense precipitation (sometimes up to 3 mm per minute), and the presence of large slopes in valleys, basins, and rivers.

The lithological composition of rocks plays a crucial role in the formation of mudflow events. In this regard, the most active mudflow factors are weathered and eroded rocks. For example, in the northern slope of the Eastern Caspian depression, within the Lower Kura depression, widely distributed sand-clay, clay, and various shales contribute to the formation of mudflow events [10].

Erosional activity exposes mountain slopes, leading to the formation of large talus deposits, the transportation of mineral residues, the accumulation of sediments, and the lowering of the relief. This includes ravines and gully formations [15]. A large portion of sediment material moves downslope at a rate of about 3 mm/min and is transported by rainfall to accumulate in the form of cone-deltas. During hot, dry summers, when intense torrential rains occur, part of the material is transported downslope from high mountain areas into river valleys (particularly Samur, Mukhakhchay, Kurmukhchay, Shinchay, Kishchay, Demiraparanchay, Goychay, Atchay, Shabranchay, etc.); however, due to water deficiency, only part of this material is carried further by rivers [16, 17].

In previous studies, mudflow events have been classified in a differentiated form. The formation of mudflow volume mainly depends on the amount of precipitation from the high mountainous areas down to the lower hills. The largest mudflow volume is observed when precipitation falls in this direction. Depending on the nature of the main rocks of river basins, mudflow events may occur in the form of muddy, detrital, or water–rock flows, with various transitional forms between them [3]. During the summer months in the Greater Caucasus, on washed slopes under the influence of orography, strong rainfall is frequently observed due to the convective movement of moist air masses toward the mountains in the first half of the day. Sometimes daily precipitation exceeds 100 mm [7].

During the transport of mudflows from high mountainous areas to lower hills, the failure of natural rock or debris dams further intensifies mudflow events. Conditions for the formation of such dams exist in the Talachay, Mukhakhchay, Kurmukhchay, Kishchay, and Shinchay valleys, where snow avalanches and landslide events occur, and riverbeds exhibit sharp meanders [14]. The failure of these dams triggers mudflow events, producing mudflow volumes several times greater than the maximum discharge of rain-induced floods.

On the southern slopes of the Greater Caucasus,

due to complex orographic and hydrometeorological conditions, mudflow events are strong and exhibit varied regimes. For example, the previously mentioned rivers experience severe catastrophic mudflows. In the Shinchay and Kishchay rivers and their tributaries, mudflow events occur on easily erodible rocks and in river basins with steep slopes [18]. In the Sariguney and other tributaries, the basins are almost entirely devoid of trees; mudflow events form in the high-altitude zone, producing strong mudflow currents. The occurrence of mudflow events has also been facilitated by deforestation for economic purposes, slope plowing, and unregulated grazing of livestock [9]. As a result, the soil and grass cover have lost their soil-stabilizing function, with intensively eroded soils, gullies, and ravines, along with fragmented materials from highly eroded bedrocks and slope deposits, accumulating in riverbeds [19].

In contrast, the Katekhchay and other rivers, flowing through forested zones, are almost devoid of rock-derived sediment supply, and therefore strong mudflow events do not form [17]. On the northeastern slopes, the Samur River exhibits its highest water content not only in spring but also during summer. However, in the northeastern slopes, particularly in the high mountainous areas, the accumulation of mudflow deposits is almost absent. In the river valley, the majority of mudflow sediments are retained, especially in areas characterized by complex orographic structures and intermountain depressions [26].

The study of mudflow events and their genesis in the Republic of Azerbaijan cannot be considered fully resolved. In this regard, conducted expeditions and hydrological monitoring indicate that mudflow events continue to recur frequently.

The purpose of the study In the study, the deposition and erosion characteristics of mudflow sediments associated with the formation of mudflows in the Greater Caucasus are analyzed. Particular emphasis is placed on the investigation of mudflow sediments transported by rivers of the southern slope of the Greater Caucasus, which are distinguished by their specific features.

Research methodology and factual materials. The study is based on expedition data, as well as on our hydrological monitoring, mainly after 2021 (Figure 1).

The results of the field work are presented in the table 1.

Results of study. The conditions of mudflows formation are different despite the equality of one and the same factor. As known, mudflow phenome-



Fig. 1. Measurement of the largest water discharges, suspended sediments and mudflow materials by the author: 1. Measurement of the largest water discharges and suspended sediments in the Gusarchay River - Kuzun village. 2. Reconnaissance work on denudation in the Gusarchay River drainage ditch area. 3 and 4. Measurement of mudflow materials on the cone delta of the Talachay River - Zagatala city

Table 1

Characteristics of mudflow deposits of the cone delta

Distance from the right side of the cone delta, m	Volume of mudflow deposits of the cone delta, m^3		Total weight of mudflow deposits, t
	wash-out	accumulation	
1. Talachay River nearby Zagatala city (near the new bridge)			
0-15	27000		54000
15-19			
19-32		163500	327000
32-48		311500	423000
48-58		150000	300000
58-65		1725000	345000
65-72		219000	438000
72-82		282000	564000
82-99		463500	927000
99-100		319500	639000
110-126.5		561000	1122000
	Σ 27000 m^3	Σ2542500 m^3	Σ5139000 m^3

na occur in nature with different intensity of torrential rains. As indicated above, not every torrential rain causes the formation of mudflows. For the formation of mudflow, in addition to intensive torrential rains, it is necessary to have loose material prepared for removal. Therefore, to study the mudflows is relevant today and in the future.

Mudflow phenomena are explained as a result of a complex and highly fragmented mountain terrain, destroyed forest cover, unsystematic plowing of the land and grazing of cattle above the norm. Therefore, the activity and frequent recurrence of mudflows can cause the destruction of the catchment surface of rivers. Especially mudflows are formed as a result of torrential rains with an intensity higher than 1-3 mm/s. Torrential rains with heavy rainfall (50-60 mm) can be observed annually, with rainfall between 80-100 mm 2 times in 10 years, and with 100 mm 1 time in 20 years or more.

The above-mentioned influencing factors on mudflows allow us to study them according to geomorphological, climatic, soil and plant cover conditions.

A number of researchers were studied the relief of the Azerbaijani part of the Greater Caucasus. The relief is distinguished by flat and mountainous, as well as north-eastern and southern slopes of the mountains [27].

Discussion of results. While previous studies emphasized the formation of mudflows, our research focuses on the characteristics of sediment deposition and erosion associated with mudflows. In recent years, due to global warming, the amount of eroded material in mudflow basins has increased, and its transport by mudflows has intensified the damage to agricultural lands in deposition cones. Nevertheless, the transported sediments related to mudflows are of practical importance as construction material and as a source of mineral fertilizer in crop production. It has been determined that coarse-grained mudflow deposits are practically suitable for use as a substitute for crushed stone in construction. In particular, the adhesive properties of the sand-sized fraction of coarse-grained mudflow deposits are advantageous in cement production. Accordingly, depending on their formation, priority has been given to studying mudflow sediments.

Geomorphological conditions of mudflow formation, as in the process of mudflow formation of the territory, distinguish high-mountain, mid-mountain and low-mountain belts.

The high-mountain belt, above 3000 m, covers the territory from the upper limit of alpine meadows to the crest of the Main Caucasian Range. This part of the territory is characterized as a wall in front of humid air masses of the Main Caucasian Range chain from the north, numerous side chains and spurs, which are steep, sheers cutting by narrow, deep gorges.

Here, bedrock is often exposed. They are composed of clay shales, sandstones and limestones [2], which are quickly subject to weathering and destruction. The increase in slope heights and their steepness allow weathering products to slide down the slope at high speed, repeatedly destroying them, and accumulate in most cases directly in river beds. The specified relief form is typical for the valleys of the rock belt and is important in the process of formation and origin of mudflows. The high-mountain belt is a convenient place for accumulation of loose deposits and the leading source of mudflow formation.

The sources enriching mudflows with detrital-loose material are divided into the following morphological groups: taluses, avalanches, placer deposits, landslides, old moraines, alluvial cones of local inflows of rivers, terraces, floodplains and channel deposits. As a result of intensive weathering, in the transitional and especially rocky belts, taluses accumulate in different geomorphological conditions.

According to the degree of their participation in mudflow formation, talus is divided into two groups:

- The first accumulates directly in river beds and participates in their formation;
- The other mass of talus accumulates far from river beds on low terraces and floodplains.

It should be noted that depending on their location in any belt, taluses are fixed in different ways. They can be divided into mobile, semi-fixed and fixed. To clarify the soil-protective role of vegetation in the mountains, we indicated in the following works [12].

Mobile taluses, starting from the sources of formation to their base, do not encounter plant obstacles. They actively participate in the formation of the mudflow, are developed mainly within the rocky belt, are widely observed in the transitional and, partially, in the mid-mountain belts.

Semi-fixed taluses are developed mainly in the transitional belt, and are also found in the mid-mountain belt. Its lower part is fixed by herbaceous vegetation and forest.

When distributing taluses over the territory, the slope of rivers and catchments has a special role. The slope of the river in the upper reaches of the Samur River is 37.2-81.4 ‰, in the rivers of the north-eastern slope of the Greater Caucasus is 82-186 ‰ and in the southern slope is 100-190 ‰, increasing they take a wall-like shape.

In the high-mountain belt of the Greater Caucasus in the source of the mudflow, large daily maximums of atmospheric precipitation are characteristic and show that on the north-eastern slope of the Greater Caucasus in the rivers Gudialchay, Velvelichay, and on the southern slope in the rivers Talachay, Mukhakhchay, Kurmukhchay, Kshshchay, Shinchay, Eyrichay, Damiraparanchay, Pirsaatchay mudflows occur with a maximum precipitation of 60-80 mm, (in rare cases catastrophic mudflow in Talachay with 188.2 mm) and with torrential rains with an intensity of 1-3 mm/s. and more [22]. Next to below the transitional belt is located up to 2000-2200 m, it covers the upper forest line, subalpine and alpine meadows. This belt stands out as an independent one, since the conditions of formation, movement and accumulation of loose sediments here are more intense than in the mid-mountain and weaker than in the rocky belt. Here, weathering products accumulate within the upper forest line, sometimes in the form of alluvial cones fixed by vegetation cover. The slope of the rivers increases to 80-90 ‰ and more. Scarps and scarp slopes are near river beds is observed here. Balakenchay, Talachay, Mukhakhchay, Shinchay, Kurmukchay, Kishchay, Damiraparanchay, Goychay, Velvelechai, Gudialchay, Agchay, Kharmidorchay and others are typical rivers. They are mainly divided into weakly mudflow-bearing, strongly mudflow-bearing and catastrophic. The catastrophic mudflow rivers include Talachay, Mukhakhchay, Kurmukchay, Shinchay, Kishchay, Goychay, etc. [11].

The mid-mountain belt consists 1000-2000 m is almost everywhere covered by dense forest, which protects the slopes from intensive surface washout and weathering. Its area occupies a wider strip than other belts. The mudflows increase due to terraces, floodplains of taluses and covers of loose sediments, which favors the accumulation of mudflow deposits directly on the bottom of the valleys, as well as in river beds. The loose materials accumulated here enrich mudflows more than in the mid-mountain areas, where they are washed away and quickly carried into the rivers during intense torrential rains.

The slopes of the rivers in the mid-mountain belt, depending on the exposure of the mountain slopes, change within the range of 28.3-37.2 ‰, 59-73 ‰ and 52-84 ‰.

The analysis shows that the mid-mountain belt takes a certain part in the additional enrichment of mudflows.

The low-mountain belt is 600-1000 m, covers the northern part of the Ganykh-Eyrichay valley, making up a strip along the entire length from northwest to southeast approximately 400 m in wide. It is almost completely covered with forest. The slopes of the rivers in the low-mountain belt, depending on the exposure of the mountain slopes, are 15.1-48 ‰, 20-57 ‰ and 22.8-5 ‰ and physical weathering is weak, and mechanical and anthropogenic are expressed comparatively more strongly. The low-mountain belt and river alluvial cones are the initial accumulation zone of mudflows. Taluses formed within the mid-mountain and low-mountain belts are fixed by forest vegetation.

The main climatic factors of mudflow formation are significant daily variations in air and soil temperature, contributing to physical weathering observed in the warm period of the year, preceded by prolonged dry periods, upcoming mudflows, and heavy rainfall. These factors are at the same time the conditions for the formation of mudflows, which in the absence of one of them are not observed or are expressed weakly.

Among the climatic factors, as the main source of energy, total solar radiation and its components

are directly related to mudflows. An increase in its value, especially direct radiation, contributes to the intensification of weathering processes, and with a predominance of the number of days with diffuse radiation, this process is weakened. The annual values of total radiation in the area of alluvial cones are 120-125 kcal/cm^2, and in the high-mountain zone at 3000-3500 m, and in the higher part it reaches up to 140-145 kcal/cm^2. The annual values of the radiation balance, with the exception of some high-mountain peaks, are positive. In the low-mountain part of the catchments area they reach up to 50 kcal/cm^2 in places, and in the mudflow formation zone they decrease up to 15 kcal/cm^2 and lower. Zonal and high-altitude circulation in the warm season is characterized by the transfer of sea air masses of temperate latitudes in the Azores high system and their entry into the territory of Azerbaijan [19].

In the studied territory of the southern slope of the Greater Caucasus, frequent passage of mudflows is observed in the Kishchay River in mid-summer and early autumn. The tributaries of the Kishchay River are divided into two groups: weakly mudflow-bearing and strongly mudflow-bearing [1]. In recent years, highly mudflow-hazardous rivers have predominated. The Gainar, Duluzdara, Dodudere and other rivers are considered weakly mudflow-hazardous. They are located within the low-mountain and partly mid-mountain belts. Their catchments are completely covered with forests and meadows. About the slopes of the rivers we noted above. There are no real opportunities for mudflows to pass in their catchments. Small rocks are very rare in the river beds. Mud torrents are mainly observed on such rivers. This phenomenon is accompanied by a terrible roar.

Mudflow forming sources are confined in the Kishchay River catchment area mainly above the forest belt boundary. Mudflow forming sources in the Kishchay River in the east and southeast are more active than mudflow forming sources on the slopes to the north and northwest.

A strong analysis of mudflow forming sources of catchment area of the Kishchay River shows that the most dangerous mudflow source is the rock belt, which cover a large area.

The area of the sources enriching mudflow in the catchment of the Kishchay River is 75 km^2 or about 46% up to the river outlet and cone.

An analysis of mudflow-forming sources of the catchment area of the Kishchay River shows that the most dangerous mudflow source is the rocky belt. The tributaries of the Damarchik River are short and directly connected to the main channel, as a result of which they can almost simultaneously carry their material there. This feature is absent in the catchments of other rivers. Mudflow sources of the Goytepe, Takachukhur, Sarytorpag rivers occupy a small area and cannot individually cause strong mudflows. These rivers, after the formation of mudflows, enter widened sections of the valley, where their strength decreases sharply.

At the same time, the formed flow in the middle part of the river is significantly enriched with channel debris. Depending on the location in one or another belt, talus is fixed in different ways. In accordance with the degree of fixation, they can be divided into mobile, semi-fixed and fixed.

Mudflows in the catchment area of the Kishchay River were observed in 1896, 1901, 1910, 1911, 1916, 1926, 1941, 1955, 1957, 1958, 1959 and 1963. They constantly threaten the city of Sheki and its villages, as well as the villages of Kish, Ohud, Dody, Baltaly located in the mudflow cone of the rivers, often putting the main structure of the Sheki hydroelectric power station out of order, destroying roads, etc. The most catastrophic mudflows were observed in 1896, 1910, 1936 and 1958. One of these flows of the river Kishchay on average carries out more than 1 million m^3 of solid material.

The conducted studies and approximate calculations, based on the traces of the passing mudflows, show that the greatest amount of mass brought by mudflows can reach 10 million m^3. The most catastrophic mudflows, based on the above noted, are recurrence once every 20 years or more, which corresponds to the frequency of daily precipitation maximums exceeding 100 mm. The remaining tributaries of the rivers Kishchay, Damarchik, Saryguney, etc. are considered highly mudflow-bearing. As mentioned above, their sources are located within the meadow and mainly rocky belts. Mudflows occur in them differently. In some, mudflows are very strong, while in others weak. Weakened mudflows cannot move down along the valley for a long distance.

In June 1947, in the Damarchik River, the daily maximum precipitation was 74.8 mm, in Sheki 68.3 mm, and in June 1963, at the indicated points, the daily maximum precipitation was 55.6 and 80.9 mm, respectively. An analysis of typical years shows that, compared to the mid-mountain area, the daily maximum precipitation increases in the low-mountain areas. This is explained by the fact that in recent years, cumulus clouds saturated with chemical waste cannot rise above 1000 m above sea level, i.e. they remain in the low-mountain belts.

Vegetation cover of the catchment area of the river Kishchay varies depending on the altitude of the area and is represented by mountain-meadow and mountain forest belts. The mountain-meadow belt, covering the territory from 1800-3000 m, and the forest belt from 500-2100 m above sea level, are represented by oriental beech (Fagus orientalis), Caucasian hornbeam (Carpinus betulus) and, partial-

ly Georgian oak (Quercus iberica Stev.). The forests of the lower mountain forest belt up to 1000 m consist of Georgian oak, hornbeam and ashtree (Fraxinus). At an altitude of 1800-2100 m, beech forests gradually disappear, replaced with slate forms, which can be explained by changes in their conditions in nature.

Soil types consist of mountain-meadow and mountain-forest soils. The area of water runoff formation at an altitude of 1000 m is 47.9%, and at an altitude of 220-1000 m, in the area of runoff loss occupies 52.1% of the total catchment area.

Here, under the influence of the latest tectonic movements, gravitational-tectonic cracks have formed, are expressed in the relief. They are clearly traced between the mountains of Garaguzey, Chakhyt, Khanyailag, etc.

The next frequently recurrences mudflow is the Kurmukhchay River.

The river is formed by the confluence of four rivers: Kunakhaysu, Bulanykhsu, Hamamchay and Aghchay. The high-mountain part of the catchment area covers the source parts of the constituent tributaries of Bulanykhsu, Kunakhaysu and Hamamchay.

The catchment area of the Kunakhaysu tributary differs from other tributaries by its continuous, abundant distribution of exposed taluses [13]. The rivers are characterized by muddy and mud-stone torrents. Muddy mudflows are often accompanied by a characteristic roar. The upper part of the catchment is covered with lush alpine meadows. The relief in this part of the catchment is characterized by strong indentation by galleys and gorges, along which the waters of the main channel flow, gradually forming deep transverse valleys. The nude of the territory, the scarcity of vegetation cover, and sharp amplitudes of air temperatures are favorable conditions for intensive mechanical and physical weathering and the formation of loose debris accumulations that feed the mudflows. The mid-mountain belt is characterized by gentle slopes and relatively a stable, thick layer of soil cover. The piedmont plain is distinguished by less dissected slopes, well-developed soil cover, and forest vegetation cover.

The Bulanykhsu River is formed by the confluence of many waterfalls. Here the mountain slopes are steep, have the shape of a cirque, are strongly dissected and are completely free of soil and vegetation covers.

The source of the Hamamchay River is bare rocky, intensely denuded cirques. There are many spring outlets in this area. Washing away the slopes, they form galleys, taluses, and channel deposits in the form of cobblestones.

The Aghchay River is two kilometers long and flows along a very steep hanging valley with frequent stepped sections. Mudflows are observed along it in mid-spring, summer, and early autumn.

The Talachay River is another interesting mudflow phenomenon. It is distinguished by the fact that it causes great damage to the economy. These mudflows are mainly water-stone torrents. The sound of mudflow deposits rolling along the bottom can be heard from afar. Mudflows mainly occur in the evening or at night. Here, the daily maximum precipitation reaches 188.2 mm. The small length of the river, rainfall mainly from the high-mountains to the low-mountains, the spread of easily eroded rocks in the catchment area, and the steepness of the mountain slopes contribute to the passage of strong mudflows. Such rivers include Mukhakhchay, Balakenchay, Damiraparanchay.

Mudflows on the north-eastern slope of the Greater Caucasus differ from those on the southern slope. On the north-eastern slope, mudflows are mainly observed in spring and autumn. Most do not have a large alluvial cone area due to the large intermountain troughs. Velvelechay, Gudialchay and Aghchay are typical rivers with strong mudflows.

Unlike in the past, in the modern period, due to global warming, the lack of transportation of river runoff contributes to the deposition of a certain part of the weathering product on the surface of river catchments, floodplains, terraces and intermountain troughs, and depressions, and most of them accumulate in the alluvial cone. The main reason for the accumulation of sediment in the alluvial cone is the weakening of the gravitational force, a decrease in potential energy to a minimum and a weakening of the kinetic energy of the river runoff. The transportation of mudflow deposits also depends on their geometric shape. Deposits closer to the shape of a ball travel longer distances, and other forms travel shorter distances. The falling of torrential precipitations in an integrated form in the direction from high-mountains to low-mountains leads to mass movement, which creates catastrophic mudflows.

The intensity of surface washout depends on the reliability of the amount of rock weathering products and their transportation [13]. The movement of the force of the denudation process determines the gravitational force of mass mudflow materials. Therefore, the study of mudflows depends on natural factors. The combination of these factors on the influence of mudflow movement requires the compilation of theoretical curves. The solution of the problem requires their interrelation.

In recent years, military actions, as well as holiday fireworks, pollute the lower layers of the atmosphere. The radiation balance in the troposphere has increased, which pollutes it and, as a result, the ecological balance is disturbed. This can be explained by the wars between Armenia and Azerbai-

jan, Russia and Ukraine, Israel and Palestine, events in France, Iran, between Turkey and Syria, Afghanistan and Iran, etc. This contributed to an increase in the discharge of chemical waste into the lower layers of the troposphere. With the increase in positive and negative charges in the troposphere, lightning became more frequent, especially between the land surface and clouds, as a result of which accidents became more frequent. For example: in 2023, in the village of Aliabad, of the Zagatala region, the roof of a secondary school, and in the village of Mukhakh, a cowshed was burned down, and on the way, lightning killed a person, and in the Gakh and Dashkesan regions, shepherds died in the subalpine meadows.

In 2023, due to the increase in the number of thunderstorms in the lower layer of the atmosphere, intense melting of ice began, which increased the flow of water in the rivers and caused mudflows. These mudflows were distinguished by a peculiarity, since they occurred at an uncharacteristic time for them. Mudflow was occurring on June 20-21, 2023 in the Talachay and Mukhakhchay, on July 4 in the Tovuzchay and Hasansu rivers in the Lesser Caucasus, on July 5-7 in the Gapychay, Eyrichay, Velvelechay, Goychay and Damiraparanchay can be example. These mudflows caused varying degrees of damage. These mudflows are caused by sudden changes in air circulation in the atmosphere, which has led to changes in synoptic processes in recent years, namely, on September 4-5, 2023, walnut-sized hail fell in Sheki, on September 7, 23 and September 16, 2023, egg-sized hail fell between the Zagatala and Balaken regions. Similar processes were observed on 09/08/23 in the villages of the Sheki district in the form of flooding, and on 09/17/23 with a rise in the water level in Talachay by 1.5 m led to mudflows near the village of Yukhari Tala, Ashaghy Tala, Magh. At the same time, in the Astara district, due to a large accumulation of suspended sediment in the river bed, a flood occurred.

The above-mentioned change in synoptic processes in the republic is caused by the penetration of air masses from midlatitudes. According to the researcher, the third type of air masses (Azov maximum) often causes precipitation in mountainous areas, accompanied by lightning and sudden changes in air temperature. Precipitation above the norm in April-May, July-September 2023 led to an increase in landslides, since water fills voids and cracks in the soil due to the slope of the terrain, the gravitational force leads to the sliding of the earth mass, which was observed in the administrative districts of Ismayilli, Lerik, Guba, Astara of Azerbaijan, the Republic of Georgia, India, Peru, Colombia, Ecuador, etc.

The activation of mudflows is mainly influenced by the direction of rainfall from high-mountain regions to low-mountain regions and vice versa. Catastrophic mudflows are mostly formed under the influence of the first direction. With the same amount of precipitation, the first direction is more strong than the second. The reasons are the catchment area coverage and the integration capacity of runoff transportation. And the second direction is characterized by a smaller catchment area coverage and spontaneous transportation of water runoff.

We discovered interesting synoptic features of precipitation distribution on the southern slope of the Greater Caucasus: on August 14, 2021, at 16-17 o'clock on the Mukhakhchay catchment between the village of Mukhakh and the city of Zagatala, where intense torrential rains fell, but interestingly, in the eastern part of the territory, there was almost no precipitation.

Another interesting fact is that the above is not observed in the Lenkaran natural region. It is identified that the fine granulometric composition of rocks contributes to less water seepage than coarse. In the Lenkaran natural region, flooding is often observed due to weak seepage of clay soils.

The next interesting fact is the effect of forest cover on sediment runoff. Despite the fact that there is forest cover in the catchment areas of the rivers of the Greater Caucasus and the Lenkaran natural region, mudflows occur on the rivers of the Greater Caucasus due to easily eroded rocks, and floods occur in the Lenkaran natural region due to rocks that are difficult to erode.

Another mudflow activator is the 11-year solar cycle. This feature was observed in the rivers of Crimea [24]. According to the researcher, with the exception of the Armenian Republic, in the Caucasus (especially in the Greater Caucasus) there is an increase in mudflow activity by one fourth and one second of the 11-year solar cycle (in 1951-1953, 1961-1963). Abroad, special attention is paid to theoretical methods, as well as the formation of the ecological balance of mudflows and mudflow processes of rainfall genesis [28].

When mudflows are activated, another factor is the influence of human economic activity. Especially if mountain pastures are used for grazing above the norm, which leads to increasing of weathering.

Conclusion. As a result of the conducted mudflow studies, the following conclusions have been drawn:

1. When studying the mudflow, emphasis was placed on the hydrological aspect of the issue, thereby paying attention not to the root cause of the phenomenon, as the mechanism of mudflow formation on mountain slopes, but also to their consequences.

2. The strong mudflow activity of the rivers in the Talachay, Mukhakhchay, Kurmukhchay, Shinchay and Kishchay catchments is most pronounced in comparison with other rivers running from the Greater Caucasus. In recent years, this can be explained by strong disruptions in synoptic processes associated with emissions of chemical waste into the lower layers of the atmosphere.

3. It was revealed that in the belt section, especially formed by strong mud-stone mudflows, the lithological relationship of differentiation of weathering products forming the alluvial cones is clearly received.

4. Modern mudflows are of current interest both as natural phenomena and as a destructive factor of mountains, requiring serious measures to combat its harmful consequences. They are also of great interest from the point of view of the formation of piedmont plumes of the alluvial cone over a long anthropogenic period.

5. The effectiveness of anti-mudflow measures largely depends on the correct consideration of the specifics of natural conditions and the patterns of manifestation of mudflow phenomena.

Bibliography

1. *Borga, M., Anagnostou, E. N., Blöschl, G., & Creutin, J. D. (2010). Flash floods: Observations and analysis of hydro-meteorological controls. Journal of Hydrology, 394(1–2), 1–3. https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2010.07.048*
2. *Chen, Q., Song, D., Chen, X., Feng, L., Li, X., Zhao, W., & Zhang, Y. (2024). Theerosion pattern and hidden momentum in debris-flow surges revealed by simple hydraulic jump equations. Water Resources Research, 60. https://doi.org/10.1029/2023WR036090*
3. *Əyyubov, A. D., Quluzadə, V. A., Nəbiyev, N. L., & Məmmədov, C. Q. (1998). Kiş və Şin çay hövzələrinin sel axınları. Bakı, 216.*
4. *Huseynov, J., & Tagiyev, A. (2024). The changes of the air temperature characteristics in the Azerbaijan territory during global climate changes period. Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology, 3(106), 76–82. https://doi.org/10.17721/1728-2713.106.10*
5. *Huseynov, J.S., Huseynova, T.M., Tagiyev, A.Sh. (2025). Assessment of the impact of climate changes on the quality of life of the population in the Greater Caucasus region of the Republic of Azerbaijan. Journal of Geology, Geography and Geoecology. 34(1), 100-111. https://doi.org/10.15421/112510*
6. *Huseynov, N., Huseynov, J., & Guliyev, Z. (2025). The conceptual model of climate change in the republic of Azerbaijan. Geojournal of Tourism and Geosites, 61(3), 1875–1886. https://doi.org/10.30892/gtg.61345-1555*
7. *Huseynov, J., Tagiyev, A., & Ismayilova, M. (2025). Characteristics of the contemporary spatiotemporal distribution of atmospheric precipitation in the southern and southeastern parts of the Greater Caucasus region. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (62), 360-371. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-27*
8. *Long, K., Zhang, S., Wei, F., Hu, K., Zhang, Q., & Luo, Y. (2020). A hydrology-process based method for correlating debris flow density to rainfall parameters and its application on debris flow prediction. Journal of Hydrology, 589, 125124. https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2020.125124*
9. *Mahmudov, R.N. (2022). Azərbaycanda regional iqlim dəyişmələri və təhlükəli hidrometeoroloji hadisələr. Bakı, 210.*
10. *Mamedov, J. G. (2011). Classification and assessment of mudflows. Proceedings of the Institute of Hydrometeorology of the Georgian Technical University, 117, 43-46.*
11. *Mammadov J. G. (2011b). The influence of global climatik changes on formulation of mudstream in the river of Major Caucausus at present. Innovations and Technoologies News, Riga, 2 (11). 3-10.*
12. *Mamedov, J. G. (2017). Dynamic features of mudflows (on the example of mudflows of the Azerbaijan part of the Greater Caucasus). Bulletin of the Kemerovo State University. Series Biological Engineering Sciences and Earth Science, 2(2), 61–66. https://doi.org/10.21603/2542-2448-2017-2-61-66*
13. *Mamedov, J. G. (2018). Mudflow as a factor of mountain destruction (on the example of the Azerbaijan part of the Greater Caucasus). Bulletin of the Kemerovo State University. Series Biological Engineering Sciences and Earth Science, 1, 61–67.*
14. *Mamedov, J. G. (2023). Patterns of surface washout in mountainous areas of Azerbaijan (on the example of river catchments of the Lenkaran Natural Region). Grozny Natural Science Bulletin, 8(2,32), 31–38. https://doi.org/10.25744/genb.2023.25.89.005*
15. *Moskalenko, S. (2025). Analysis and assessment of the limiting intensities of processes forming maximum water runoff rivers of the right and left banks of the Dniester River basin. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (62), 273-286. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-20*
16. *Mustafabəyli, H.L., & Rəhimov, Y.R. (2017). Şin və Kiş çayları hövzələrində təhlükəli sel hadisələrinin (03.07.2016-cı ildə) yaranma səbəbləri. Coğrafiya və təbii resurslar, 1 (5). 49-53.*
17. *Nəbiyev, H. L. (2007). Böyük Qafqazın cənub yamacında sellərin statistik təhlili və onların yaranmasının sinoptik-iqlim şəraiti. Azərbaycan Coğrafiya Cəmiyyətinin əsərləri, 11, 342-349.*
18. *Nəbiyev, H.L., Tağıyeva, U.R., & Əhmədova, Q.B. (2023). Azərbaycan Respublikası ərazisində məhəllin oroqrafik şəraitinin və havanın sirkulyasiyanın seləmələgəlmədə rolu. Coğrafiya və təbii resurslar. Azərbaycan Coğrafiya Cəmiyyətinin Əsərləri, 1(19), 17-24.*
19. *Nasibova, G. J., Mukhtarova, Kh. Z., & Ganbarova, Sh. A. (2024). Modelling of geochemical properties of mud volcano eruption products and relationship with oil and gas prospects within the South Caspian megadepression of*

Lower Kura region. Journal of Geology, Geography and Geoecology, 33(2), 329–339. https://doi.org/10.15421/112431

20. *Paşayev, N.Ə. (2018). Azərbaycan Respublikasında təbii fəlakətlərin təsərrüfata təsirinin iqtisadi-coğrafi qiymətləndirilməsi. Bakı, 372.*
21. *Rzaeva, S., Guseynov, J., & Tagiyev, A. (2023). Assessment of the impact of climate change on the precipitation regime in the southern slope of the Greater Caucasian province. Reliability: Theory and Applications, 18 (5,75), 404–410. https://doi.org/10.24412/1932-2321-2023-575-404-410*
22. *Rzaeva, S., Tagiyev, A., & Zeynalova, S. (2022). Impact of climate change on the groundwater of the Ganikh-Ayrichay foothills. Reliability: Theory and Applications, 17(4,70), 180–187. https://doi.org/10.24412/1932-2321-2022-470-180-187*
23. *Sadkou, S., Artigue, G., Fréalle, N., Ayral, P.-A., Pistre, S., Sauvagnargues, S., & Johannet, A. (2024). A review of flash-floods management: From hydrological modeling to crisis management. Journal of Flood Risk Management, 17(3). https://doi.org/10.1111/jfr3.12999*
24. *Shvarev, S.V., Kharchenko, S.V., Golosov, V.N. et al. (2021). A Quantitative Assessment of Mudflow Intensification Factors on the Aibga Ridge Slope (Western Caucasus) over 2006–2019. Geogr. Nat. Resour. 42, 122–130. https://doi.org/10.1134/S1875372821020128*
25. *Sikan, A.V., & Imanov, F.A. (2023). Features of formation and long-term fluctuations of the low flow of rivers in the Greater Caucasus. Advances in Biology & Earth Sciences, 8(3), 272-287.*
26. *Tarikhazer, S. (2022). Assessment of ecological-geomorphological strength and risk of geosystems of the north-eastern slope of the Great Caucasus (within Azerbaijan). Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (56), 264-276. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-56-20*
27. *Tarikhazer, S., Karimova, E., & Kuchinskaya, I. (2023). Quantitative assessment of mudflow risk in the Greater Caucasus of Azerbaijan (on the example of the northeastern slope). Journal of Geology, Geography and Geoecology, 31(4), 722-735. https://doi.org/https://doi.org/10.15421/112268*
28. *Zaporozhchenko, E. V., & Chernomorets, S. S. (2005). Chronicle of the conduct of mudflow forms and the current stage of development of the science of mudflows. Geoecology: Engineering Geology and Hydrogeology, (1), 90–96.*

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

References

1. *Borga, M., Anagnostou, E. N., Blöschl, G., & Creutin, J. D. (2010). Flash floods: Observations and analysis of hydro-meteorological controls. Journal of Hydrology, 394(1–2), 1–3. https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2010.07.048*
2. *Chen, Q., Song, D., Chen, X., Feng, L., Li, X., Zhao, W., & Zhang, Y. (2024). The erosion pattern and hidden momentum in debris-flow surges revealed by simple hydraulic jump equations. Water Resources Research, 60. https://doi.org/10.1029/2023WR036090*
3. *Eyyubov, A. D., Guluzade, V. A., Nabiyev, N. L., & Mammadov, J. G. (1998). Mudflows of the Kish and Shin River Basins. Baku, 216. [in Azerbaijani]*
4. *Huseynov, J., & Tagiyev, A. (2024). The changes of the air temperature characteristics in the Azerbaijan territory during global climate changes period. Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology, 3(106), 76–82. https://doi.org/10.17721/1728-2713.106.10*
5. *Huseynov, J.S., Huseynova, T.M., Tagiyev, A. Sh. (2025). Assessment of the impact of climate changes on the quality of life of the population in the Greater Caucasus region of the Republic of Azerbaijan. Journal of Geology, Geography and Geoecology. 34(1), 100-111. https://doi.org/10.15421/112510*
6. *Huseynov, N., Huseynov, J., & Guliyev, Z. (2025). The conceptual model of climate change in the republic of Azerbaijan. Geojournal of Tourism and Geosites, 61(3), 1875–1886. https://doi.org/10.30892/gtg.61345-1555*
7. *Huseynov, J., Tagiyev, A., & Ismayilova, M. (2025). Characteristics of the contemporary spatiotemporal distribution of atmospheric precipitation in the southern and southeastern parts of the Greater Caucasus region. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology, Geography, Ecology, (62), 360-371. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-27*
8. *Long, K., Zhang, S., Wei, F., Hu, K., Zhang, Q., & Luo, Y. (2020). A hydrology-process based method for correlating debris flow density to rainfall parameters and its application on debris flow prediction. Journal of Hydrology, 589. https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2020.125124*
9. *Mahmudov, R. N. (2022). Regional climate changes and hazardous hydrometeorological events in Azerbaijan. Baku: National Aviation Academy, 210. [in Azerbaijani]*
10. *Mamedov, J. G. (2011). Classification and assessment of mudflows. Proceedings of the Institute of Hydrometeorology of the Georgian Technical University, 117, 43–46.*

11. Mammadov, J. G. (2011). The influence of global climatic changes on formulation of mudstream in the river of Major Caucasus at present. Innovations and Technologies News, Riga, 2(11), 3–10.
12. Mamedov, J. G. (2017). Dynamic features of mudflows (on the example of mudflows of the Azerbaijan part of the Greater Caucasus). Bulletin of the Kemerovo State University. Series Biological Engineering Sciences and Earth Science, 2(2), 61–66. https://doi.org/10.21603/2542-2448-2017-2-61-66
13. Mamedov, J. G. (2018). Mudflow as a factor of mountain destruction (on the example of the Azerbaijan part of the Greater Caucasus). Bulletin of the Kemerovo State University. Series Biological Engineering Sciences and Earth Science, 1, 61–67.
14. Mamedov, J. G. (2023). Patterns of surface washout in mountainous areas of Azerbaijan (on the example of river catchments of the Lenkaran Natural Region). Grozny Natural Science Bulletin, 8 (2, 32), 31–38. https://doi.org/10.25744/genb.2023.25.89.005
15. Moskalenko, S. (2025). Analysis and assessment of the limiting intensities of processes forming maximum water runoff rivers of the right and left banks of the Dniester River basin. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology, Geography, Ecology, (62), 273–286. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-20
16. Mustafabayli, H. L., & Rahimov, Y. R. (2017). Causes of hazardous mudflow events (July 3, 2016) in the Shin and Kish River basins. Geography and Natural Resources, 1(5), 49–53. [in Azerbaijani]
17. Nabiyev, H. L. (2007). Statistical analysis of mudflows on the southern slope of the Greater Caucasus and the synoptic-climatic conditions of their formation. Proceedings of the Azerbaijan Geographical Society, 11, 342–349. [in Azerbaijani]
18. Nabiyev, H. L., Taghiyeva, U. R., & Ahmadova, G. B. (2023). The role of orographic conditions and air circulation in the formation of mudflows in the territory of the Republic of Azerbaijan. Geography and Natural Resources. Proceedings of the Azerbaijan Geographical Society, 1(19), 17–24. [in Azerbaijani]
19. Nasibova, G. J., Mukhtarova, Kh. Z., & Ganbarova, Sh. A. (2024). Modelling of geochemical properties of mud volcano eruption products and relationship with oil and gas prospects within the South Caspian megadepression of Lower Kura region. Journal of Geology, Geography and Geoecology, 33(2), 329–339. https://doi.org/10.15421/112431
20. Pashayev, N. A. (2018). Economic and geographical assessment of the impact of natural disasters on the economy in the Republic of Azerbaijan. Baku, 372. [in Azerbaijani]
21. Rzaeva, S., Guseynov, J., & Tagiyev, A. (2023). Assessment of the impact of climate change on the precipitation regime in the southern slope of the Greater Caucasian province. Reliability: Theory and Applications, 18 (5,75), 404–410. https://doi.org/10.24412/1932-2321-2023-575-404-410
22. Rzaeva, S., Tagiyev, A., & Zeynalova, S. (2022). Impact of climate change on the groundwater of the Ganikh-Ayrichay foothills. Reliability: Theory and Applications, 17 (4,70), 180–187. https://doi.org/10.24412/1932-2321-2022-470-180-187
23. Sadkou, S., Artigue, G., Fréalle, N., Ayral, P.-A., Pistre, S., Sauvagnargues, S., & Johannet, A. (2024). A review of flash-floods management: From hydrological modeling to crisis management. Journal of Flood Risk Management, 17(3). https://doi.org/10.1111/jfr3.12999
24. Shvarev, S. V., Kharchenko, S. V., Golosov, V. N., et al. (2021). A quantitative assessment of mudflow intensification factors on the Aibga Ridge slope (Western Caucasus) over 2006–2019. Geography and Natural Resources, 42, 122–130. https://doi.org/10.1134/S1875372821020128
25. Sikan, A. V., & Imanov, F. A. (2023). Features of formation and long-term fluctuations of the low flow of rivers in the Greater Caucasus. Advances in Biology & Earth Sciences, 8(3), 272–287.
26. Tarikhazer, S. (2022). Assessment of ecological-geomorphological strength and risk of geosystems of the northeastern slope of the Great Caucasus (within Azerbaijan). Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (56), 264–276. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-56-20
27. Tarikhazer, S., Karimova, E., & Kuchinskaya, I. (2023). Quantitative assessment of mudflow risk in the Greater Caucasus of Azerbaijan (on the example of the northeastern slope). Journal of Geology, Geography and Geoecology, 31(4), 722–735. https://doi.org/10.15421/112268
28. Zaporozhchenko, E. V., & Chernomorets, S. S. (2005). Chronicle of the conduct of mudflow forms and the current stage of development of the science of mudflows. Geoecology: Engineering Geology and Hydrogeology, (1), 90–96.

Характеристика виникнення селевих потоків та вивчення селевих відкладів в азербайджанській частині Великого Кавказу

Джума Мамедов [1]
PhD (географія), доцент, пров. наук. співробітник,
[1] Міністерство науки і освіти Азербайджану,
Інститут географії, Баку, Азербайджан;
Агіл Гаджиєв [2]
аспірант, ст. викладач,
[2] Національна авіаційна академія,
АТ «Азербайджанські авіалінії», Баку, Азербайджан;
Махаммед Гулієв [3]
PhD (географія), викладач,
[3] Нахічеванський державний університет,
Нахічевань, Азербайджан

За останні роки серія гідрологічних спостережень досліджуваної території показує, що селеві потоки не тільки слабшають, але й у низці регіонів, де раніше селеві потоки не відзначалися, почали проявлятися в активній формі. Це пояснюється тим, що в останні роки виявлення селевих потоків збільшило насиченість викидами змішаних хімічних відходів у нижні шари атмосфери, пов'язаних з військовими діями в південно-західній частині Євразії, а також між Росією та Україною. Вітри, що надходять на територію Азербайджану із заходу з хімічними відходами, забруднюють повітряні маси порівняно з північними. У тропосфері підвищується радіаційний баланс, що забруднює її та, як наслідок, порушується екологічний баланс і впливає на проходження селевих потоків вздовж Великого Кавказу. Метою дослідження є аналіз розподілу селевих потоків з урахуванням регіональної специфіки Великого Кавказу та природних факторів, що впливають на них, спричиняючи формування селевих потоків. Річки досліджуваної території загалом характеризуються поширеністю всіх типів селів порівняно з іншими районами. Селі річок південного схилу Великого Кавказу мають особливу особливість. Було визначено, що селі, поряд зі змінами синоптичних процесів та інтенсивністю добових опадів, залежать від напрямку високогір'я до низовин і навпаки, від їх опадів. З цих причин, при однаковій кількості опадів, у першому випадку на річках виникають селі, а в другому випадку – повені. Це пояснюється в першому випадку достатньою, а в другому випадку недостатньою кількістю продуктів вивітрювання від поверхневого змиву. Було встановлено, що в розрізі поясу, особливо утвореному сильними селевими потоками, чітко проявляється літологічний зв'язок диференціації продуктів вивітрювання, що формують конусоподібні дельти. У найближчих до передгір'їв низовинних ділянок, в частинах конусоподібної дельти, розріз майже повністю складається з грубозернистого матеріалу з хвилеподібно-плиткоподібними суспензіями, гравієм та грубим піском. У міру віддалення від передгірної рівнини до рівнини спостерігається наявність похилих пісків, які представлені в розрізі сухих дельт і спричиняють ударні потоки води. Подібне спостерігається на конусоподібних дельтах річок Талачай, Найбулаг, на конусоподібних дельтах поблизу села Сувагіл, де вода виходить на поверхню землі.

Ключові слова*: селевий потік, русло річки, грязьовий потік, ерозія, перенесення осаду, завислий вантаж, екзогенний процес, сильний дощ.*

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу
Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 14 травня 2025 р.
Прийнята 30 вересня 2025 р.

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-21
UDC 556.535.5

Received 31 August 2025
Accepted 3 October 2025

Glacier regime of the Drakhtik River (Lake Sevan basin) in the conditions of climate change

Varduhi Margaryan [1]
PhD (Geography), Associate Professor of the Department of Physical Geography and Hydrometeorology,
[1] Yerevan State University, Yerevan, Armenia,
e-mail: vmargaryan@ysu.am, https://orcid.org/0000-0003-3498-0564;
Svitlana Reshetchenko [2]
PhD (Geography), Associate Professor of the Department of Physical Geography and Cartography,
[2] V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: s.reshetchenko@karazin.ua, https://orcid.org/0000-0003-0744-4272;
Sviatoslav Dmitriiev [2]
PhD student at the Department of Physical Geography and Cartography,
e-mail: s.dmitriiev@student.karazin.ua, https://orcid.org/0000-0001-9256-6455

ABSTRACT

Formulation of the problem. River ice plays a significant role in biological, chemical, and physical processes occurring in freshwater bodies of temperate latitudes. In high latitudes and at high elevations, one of the main factors controlling hydrological and biogeochemical processes is river and lake ice formation and breakup. In the context of contemporary climate change, the importance of systematic studies of river ice regimes has increased.

The aim of the study is to investigate the ice regime of the Drakhtik River and to analyze and evaluate the patterns of temporal distribution and changes in ice phenomena.

Methods. The study is based on observational data on the water and ice regime of the Drakhtik River, as well as data on air and water temperature and atmospheric precipitation.

Results. The paper presents the results of a study of the spatio-temporal features of the ice regime of the Drakhtik River, which belongs to the Lake Sevan basin. The research is based on long-term meteorological, climatic, and hydrological observations for the period 1956–1957 to 2024–2025, obtained from the Center for Hydrometeorology and Monitoring of the Ministry of Environment of the Republic of Armenia for the Drakhtik River near the Drakhtik settlement.

The temporal analysis of ice regime characteristics indicates a tendency toward a reduction in the duration and intensity of ice cover. A decrease in both the duration of ice phenomena and the period of stable ice cover has been recorded. At the studied hydrological stations, the dates of freeze-up and ice breakup remain relatively stable. A clear relationship between air temperature fluctuations and ice formation parameters was identified, particularly during the winter period. Ice growth throughout the winter depends on hydrometeorological conditions – air temperature, amount of precipitation, thickness of snow cover on ice, its density, etc. Ice growth in the studied area occurs throughout the winter until the river opens up. Over the studied time interval, the maximum ice thickness has a decreasing trend at the studied posts – k linear trend coefficient thickness of ice makes up - 3.4 cm/10 years. The thickness of the snow cover on the ice also has a downward trend. The maximum thickness of the snow cover on the ice was 23-24 cm.

Changes in river ice phenomena are directly related to climatic dynamics, primarily air temperature. Under current climatic conditions, freeze-up dates tend to shift to later periods, while ice breakup dates occur earlier, resulting in a shorter ice-cover duration. The maximum ice thickness shows a consistent decreasing trend, similar to that observed on other rivers. Snow depth on the ice also tends to decrease.

Keywords*: ice phenomena, air temperature, freezing, ice cover, precipitation, water level, discharge, Drakhtik River.*

In cites: Margaryan Varduhi, Reshetchenko Svitlana, Dmitriiev Sviatoslav (2025). Glacier regime of the Drakhtik River (Lake Sevan basin) in the conditions of climate change. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 278-288. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-21

Problem description. River ice plays a significant role in biological, chemical, and physical processes occurring in freshwater bodies of temperate latitudes [17]. In high latitudes and at high elevations [16], one of the main factors controlling hydrological and biogeochemical processes is river and lake ice formation and breakup. In the context of contemporary climate change, the importance of systematic studies of river ice regimes has increased [5-12]. Many types of economic activity are associated with the timing and duration of ice phenomena - navigation conditions, normal functioning of hydraulic structures, organization of crossings. Features of the ice regime of rivers are a significant component of the rational use of transport infrastructure and, as a consequence, the socio-economic development of territories.

The ice factor plays a significant role in changing the winter water content of rivers. Research carried out in different river basins, showed that the change in winter river water content plays a significant role the combination of temperature and ice plays a role conditions. Ice cover regulates the participation of groundwater at different drainage levels in the formation of river runoff. With global warming, the regulating role of ice cover is decreasing. A de-

© Margaryan Varduhi, Reshetchenko Svitlana, Dmitriiev Sviatoslav, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

crease in groundwater reserves in river basins will lead to a decrease in their regulating role in river runoff and an increase in the frequency of occurrence of extremely low water content [5].

All rivers are divided into three large groups according to the nature of their ice regime: freezing, with unstable ice cover and non-freezing. Rivers of the middle latitudes usually freeze in winter. Three characteristic periods are distinguished on freezing rivers: 1) freezing (autumn ice phenomena); 2) freeze-up; 3) breaking up (spring ice phenomena).

The aim of the work is to study the ice regime of the Drakhtik River flowing into Lake Sevan, to identify, analyze and evaluate the patterns of temporal distribution and changes in ice phenomena. For this purpose, the following tasks were set and solved in the work: collection, processing and analysis of actual observation data for the studied rivers and; analysis and evaluation of the features of the formation of ice phenomena; evaluation of patterns of temporal changes taking into account weather and climatic conditions and physical and geographical factors of the catchment area.

Research on the ice regime in modern climatic conditions is reflected in the works [5-12] and shows that the increase in winter temperature is manifested, in particular, in the softening of the ice regime of rivers and lakes. It should be noted that the ice regime of the rivers of the Republic of Armenia, including the territory under study, has been studied rather poorly.

The area adjacent to the Drakhtik River valley is mountainous and heavily rugged (Fig. 1). The river valley is trough-shaped with steep, high slopes composed of volcanic rocks, covered in places with alpine meadows. The river bed in the area of the post is straight, composed of cobblestones, gravel, pebbles, sand. The banks are flat, low, floodable. Mudflows often pass along the river. The water measuring rod post (Drakhtik) is located on the left bank of the river, equipped with a rod. In winter, there are banks and ice on the river. The zero height of the post is 1920.92 m BS. The water temperature is measured at the water post on the left bank.

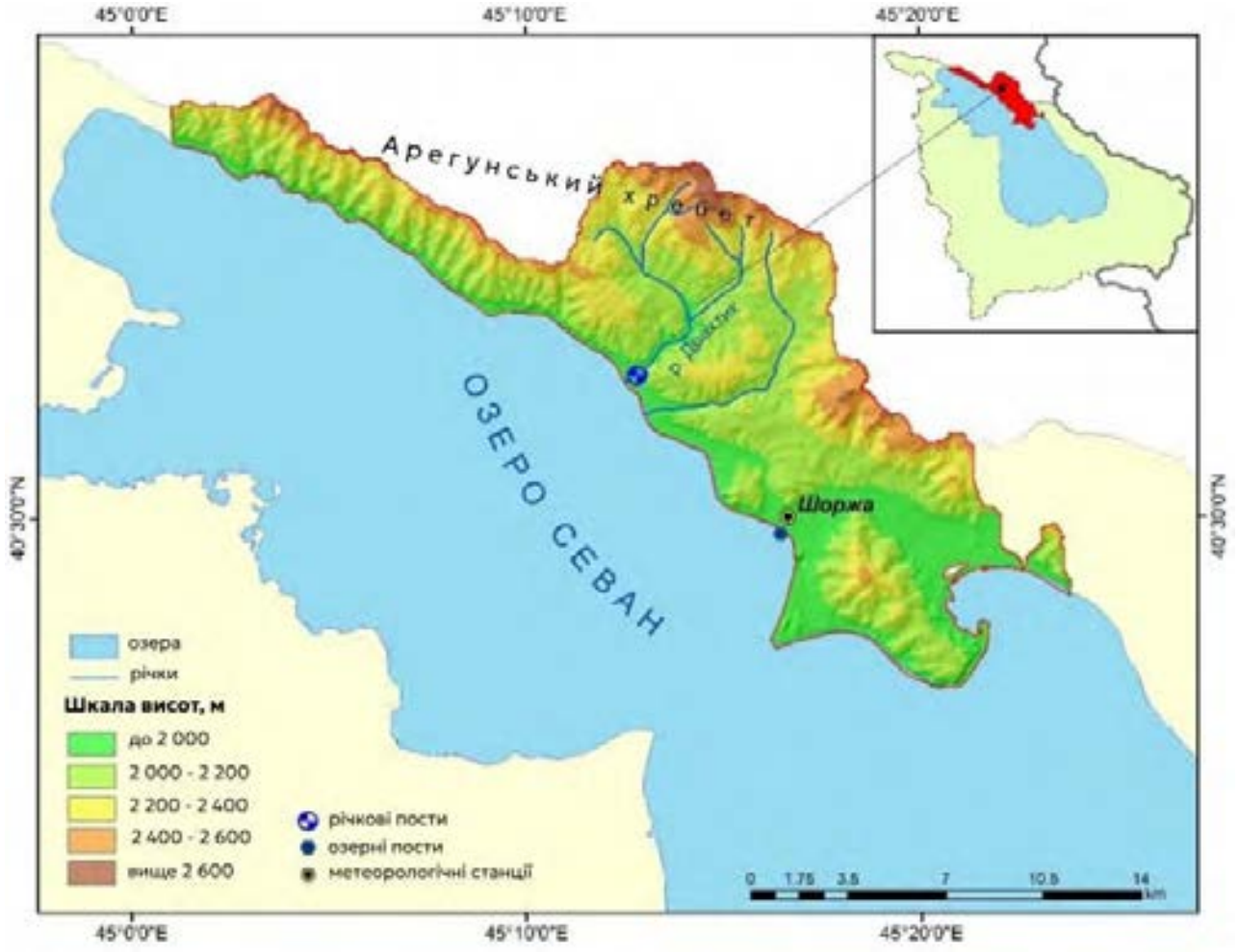


Fig. 1. Map-scheme of the hydrographic network of the river basin Drakhtik

The Drakhtik River originates mainly from the highlands and has a large slope. The average slope of the Drakhtik River from a remote point is 51 ‰, and the average slope of the catchment area is 2 4 6 ‰. The catchment area for the Drakhtik post is 3 9.2 km^2 , average altitude – 2,270 m. Degree of forestation

and lake coverage pool a r. Drakhtik 0 %, ploughing is insignificant : it does not exceed 35% (table 1). In particular, tributaries of Lake Sevan (River Drakhtik), flowing down from steep and relatively short slopes of the Aeguniysky ridges, are characterized by small values of the sinuosity coefficient.

Table 1

Main hydrographic characteristics of the catchment area of the rivers and Drakhtik

Distance from mouth, km	Distance from the hydrometric section to the most remote point of the river system, km	Average slope of the river from a distant point, ‰	**Main characteristics of the catchment area**				
			average height, m	average slope, ‰	forestedity, %	lakeness, %	ploughing, %
0.8	7.9	51	2270	246	0	0	35

The rivers that wander along the floodplain have a bed composed of easily erodible soils. Its deformation occurs almost continuously: in some places there is erosion, in others – alluvium. Due to the instability of the banks, the bed moves within the floodplain part of the valley. This is typical for the lower reaches of the Drakhtik rivers. For them, for almost the entire year, there is no clearly expressed relationship between the level and flow rate. In some cases, the deformation can be so significant that with single-digit levels, the water flow rates differ from each other in absolute values by 10-15 times.

Materials and methodology. The source materials used in the work are actual observation data on the water and ice regime of the Drakhtik River, which flows into Lake Sevan (at the Drakhtik section), as well as data on air and water temperature, atmospheric precipitation, conducted by Armhydromet both at the water post and at the Sevan weather station, including the results of field work.

Table 2 provides information on We have one post for the hydrological posts (GP) under study. Mudflows often occur on the river. As a result of a mudflow on 04/05/1967, a water-gauge rod was demolished, a section of the post was destroyed, as a result of which the post was moved on 05/05/1967 500 m upstream. The new post is located on the right bank, equipped with a rod and a benchmark. The zero height of the graph of the new water post has been changed by the amount of the drop and is equal to 1920.29 m BS. Level observations before and after the post was moved are not comparable. That's why

Table 2

The hydrological post under study on the Drakhtik River

Name fasting	Code post	Geographic coordinates		Distance from the mouth, km	Square catchment area, km^2	Height zero graphics		Beginning of action date, month, year
		width	longitude			height, m	system heights	
Drakhtik	85353	40.5462	45.2122	0.8	39.2	1920.92	BS	12/08/1926 (05/05/1967)

our research are being carried out since 1967.

For each hydrological year, the dates of the beginning and end of ice phenomena, as well as the dates of the beginning and end of freeze-up, were determined at the studied posts. The duration in days of the freezing and freeze-up phases was calculated. The earliest and latest dates of the appearance and disappearance of ice on the river were determined, as well as the average dates for the studied period. As part of the study, the maximum and average ice thickness at the posts for the studied hydrological year was established.

The date of the beginning of ice phenomena is determined by the appearance of their first signs (coasts, slush, etc.), the end date is the complete clearing of the river from ice. Short-term cases of ice phenomena before or after a break of more than 10 days were not taken into account. For example, in 1984, ice phenomena were observed from October 18 to 23, then reappeared only on December 2. Therefore, December 2 was considered the beginning of ice phenomena.

In the course of the research, methods of hydrological analogy, interpolation, extrapolation, mapping, as well as standard methods of statistical analysis were used.

Results and discussion. Ice phenomena occur on the Drakhtik River every year. The formation of the ice regime depends on a large number of local factors, constant ones - hydraulic and morphometric parameters of the river bed, and variables that change every year and have a direct impact on the processes of formation of the winter regime of rivers, i.e. climatic parameters. Various types of anthropogenic im-

pact are also of particular relevance.

Climate parameters have been subject to significant changes in recent decades, which will certainly affect the ice regime of this water body. In mountainous countries, including the Republic of Armenia, local factors causing ice phenomena are complex, varied and poorly studied.

As a rule, when the water temperature in the river drops below 0°C, the river enters its winter regime phase, and the process of ice formation is observed in it. The moment of establishment of negative air temperatures, accompanied by the appearance of ice phenomena in the river, is conventionally accepted as the beginning of winter, and the moment of release of ice is considered the end of winter [1-4, 9]. To assess the impact of climatic conditions on the formation of ice phenomena, the results of observations of air temperature and precipitation at 08:00 and 20:00 in the area of the Drakhtik hydrological post for 2011/12–2024/25 were used, due to the failure to save observations for previous years. The values of average air temperatures for the period November–March fluctuate from -4.7 to 0°C, and the values of average water temperatures – from 0 to 2.2°C (Table 3). Air temperature begins to rise in February. Beginning in November, it begins to fall rapidly. The lowest average monthly temperature air temperature falls in January (-4.7°C): its fluctuations occur within the range from - 7.9 to - 2.8. Sometimes (27-28/01/2016) average daily air temperatures of -15.0°C and below were recorded. The course of air and water temperatures coincides, while the fluctuations in average daily water temperature values are less than the fluctuations in air temperature. With the exception of April, water temperature values exceed air temperature values.

Table 3

Climatic characteristics of the Drakhtik River in the Drakhtik section, 2011/12 -2024/2025

XI	XII	I	II	III	IV
with average air temperature, °C					
1.8	-2.6	-4.7	-3.6	0.0	5.9
number of days with air temperatures above 0 °C					
21.3	7.3	1.3	4.6	16.1	28.6
sum of positive temperatures, °C					
74.6	13.4	2.0	6.8	46.9	180.5
average water temperature months, °C					
2.9	1.0	0.0	0.0	2.2	4.9
amount of precipitation, mm					
16.9	15.4	16.0	17.8	38.5	38.5
number of days with precipitation of 0.1 mm and above, days					
4.1	4.4	5.9	5.6	9.9	9.2

IN cold winters meanings temperatures water Not were observed. These meanings Can reconstruct With help close correlations between temperatures water And air (Fig. 2).

Of great importance for hydrological processes is the time of transition of air temperature through 0°C in spring, which is associated with the beginning of snowmelt and flooding. The dates of transition of

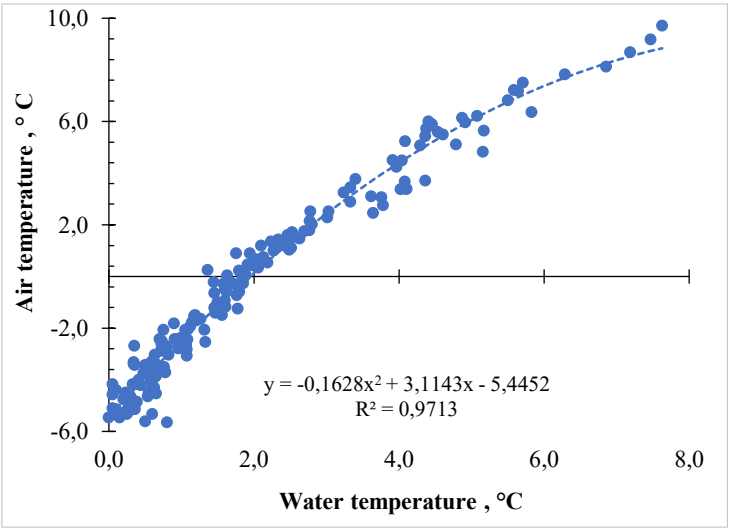


Fig. 2. Correlation between air and water temperature values for the cold period (XI - IV)

average daily air temperatures through 0°C in autumn and spring are also a sign of the beginning and end of winter. On the river Drakhtik – settlement Drakhtik the date of transition of average daily air temperatures through 0°C in spring occurs in the first and second ten-day periods of March, and sometimes in the third ten-day period of February. The transition of average daily air temperatures through 0°C in autumn is observed in the first ten-day period of December, and sometimes in the second or third ten-day period of November. The duration of the cold period fluctuates within wide limits – from 75 to 145 days. The beginning of the frost-free period falls on average on 23/III. The average date of the end of the frost-free period is 28/Nov.

The number of days with positive temperatures has been calculated and sum of positive temperatures during the cold period. The lowest value was recorded in January. This means that in January, negative air temperatures are predominantly observed in the territory under consideration. In total, positive temperatures were observed for 1–4 days, the maximum was observed in 2024 and amounted to 7 days. The lowest value of the sum of positive temperatures during the winter period is also observed in January - 2.0°C.

Precipitation is determined by circulation factors, including local circulation of air masses. In the Drakhtik basin during the observed period (XI – IV), the minimum amount of precipitation falls in December and January – 15.4-16.0 mm. The average amount of precipitation for the entire period under consideration (2011/2012 – 2023/2024) ranges from 96.8 (2011/2012) to 178.0 (2014/2015) mm, and the number of days with precipitation of 0.1 mm and above is from 29 (2011/2012) to 52 (2017/2018, 2020/2021) days. The minimum number of days with precipitation of 0.1 mm and above falls in December (4.4 days), the maximum – in March (9.9 days). The daily maximum precipitation is 27 mm.

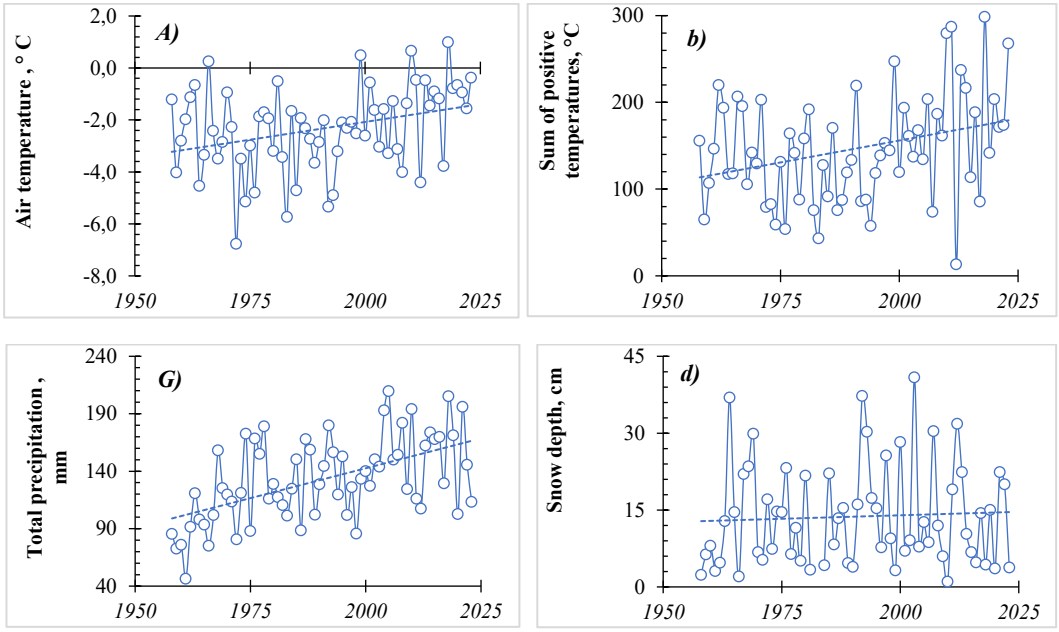


Fig. 3. Long-term changes in air temperature (a) and the sum of positive temperatures (b) in °C, precipitation totals (years) and average snow depth in March (days) for the cold period (XI-III) for the Sevan weather station

Shown change temperatures air And precipitation For weather stations Sevan, located V pool lakes Sevan (Fig. 3). At the Sevan weather station, an increase was recorded throughout the study period (November – March). air temperature during the cold period. The linear trend coefficient for the average air temperature is + 0.27, and for the sum of positive temperatures – + 10.1°C/10 years. On the investigated the territory also shows a tendency towards an increase in the amount of precipitation and the average height snowy cover V March , k linear trend coefficient The amount of precipitation is + 10,4 mm/10 years , k coefficient of linear trend average height snowy cover V March – +0,27 s m/10 years.

Research shows that for the period 19 57/58 – 2024/25 for the river Drakhtik. Drakhtik there is a pronounced increase in the average air temperature during the cold period, the sum of positive temperatures, the amount of precipitation and the average heights snowy cover V March. Therefore, this change will certainly affect the water-ice regime of the study area.

The relatively small size of the catchment areas, the proximity of the feeding areas to the discharge point, the low permeability of the rocks that make up the surface of the basins, the mountainous, heavily dissected terrain, almost devoid of woody vegetation, the significant slopes of the watercourses, the dry

continental climate. All this leaves a bright imprint on the hydrological regime of the rivers. Their flow is distributed extremely unevenly throughout the year. Since, due to geological conditions, surface runoff prevails over underground runoff, the groundwater supply of the rivers is insignificant and the coefficient of natural regulation is low. On the Drakhtik River, up to 60-65% of the annual flow passes during the spring flood, about 25% in the summer-autumn season, the rest (10-15%) falls on the low-water period of the winter low water.

The winter low water period is established mainly in late November – early December and lasts until the first spring rises in water level. The dates of its beginning and end are also closely related to the altitude of the area. Water flow in the river is maintained in winter due to the inflow of underground waters into their beds. In the lower reaches of the rivers, short-term rises in water level due to thaws are possible. However, in many cases this does not particularly affect the average monthly flow values. The duration of the lowest water period during the winter low water period is about 25-30 days.

Determining the date of the beginning of the winter low water period is difficult because of the unclear transition from the summer-autumn to the winter low water period. This is especially true for rivers where in some years the fluctuations in water levels and discharges are so small that the transition from the summer to the winter regime of the river is very imperceptible.

During strong and sudden cold snaps, which sometimes occur at the end of the autumn season, a correspondingly sharp decrease in runoff is observed due to a decrease in the inflow of groundwater.

The values of water levels and discharges in the Drakhtik River for the period November – March fluctuate within a small range, the water level is from 38 to 43 cm, and the values Water flow rate – from 0.074 to 0.22 m^3/s (Table 4). The water level remains virtually unchanged from November to mid-March, after which it begins to rise. Water flow rate decreases from November to January, after which it increases due to warming. The lowest monthly value (0.074 m^3/s) was recorded in January.

The results of the study confirm the transformation of the average winter runoff of the Drakhtik River. The results obtained indicate an increase in the average value winter runoff for the Drakhtik River (Fig. 4) and the growth of the value of the winter runoff characteristic for most rivers in the Lake Sevan basin [1-2, 9].

Table 4

Level water And consumption waters of the Drakhtik river in the Drakhtik section, 1967/68 – 2024/2025

Water level (cm) for the XI – III period					Water flow (m^3/s) for XI – III II period				
XI	XII	I	II	III	XI	XII	I	II	III
39	38	39	39	43	0.11	0.091	0.074	0.089	0.22

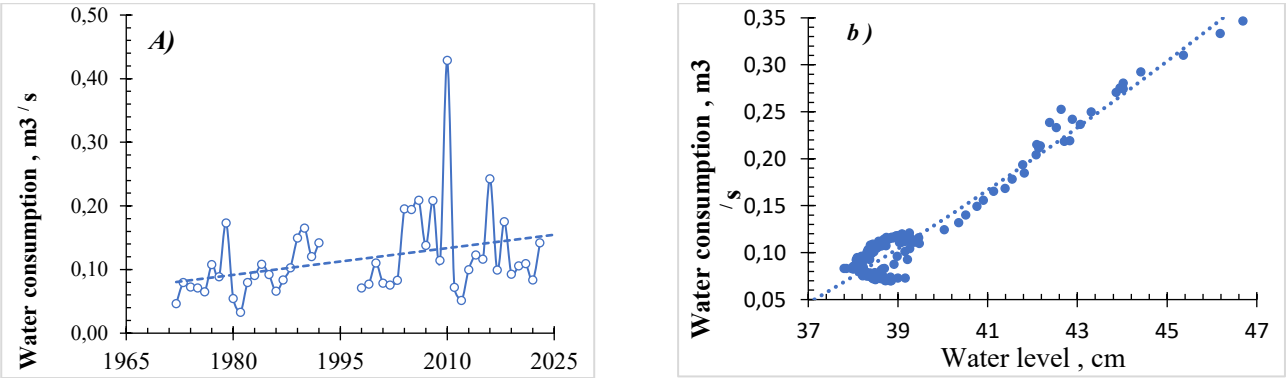


Fig. 4. Long-term changes in water consumption (a), correlation relationship between the values of water level and flow rate (b) Drakhtik river

Ice regime. Every year, various ice phenomena of varying size and duration are formed on the river under study: ice banks, freeze-up, etc. There are no spring or autumn ice drifts, slush drifts, ice jams or ice dams on the river under study.

The duration of freezing (from the appearance of ice phenomena to the establishment of ice cover) on the Drakhtik River at the Drakhtik outlets averages 19 days and fluctuates from 78 (2001/02) to 2 days (1983/84, 1986/87, 2023/24) (Table 5). The earliest date of the onset of ice phenomena is 01 November 1976, 1982, the latest is January 24, 2024. There were years, and rare ones at that (1984, 1987), when in the last ten days of October an ice phenomenon was observed, interrupted by a period of 10 days or more, which was therefore not included in the calculations.

Among the rivers of the Lake Sevan basin, the Drakhtik River stands out for the largest number of

Table 5

Characteristics of the ice regime of the Drakhtik River in the Drakhtik section, 1974/75 – 2024/2025

Start date		Date Endings		Duration, day		
ice phenomena	ice formation	ice formation	ice phenomena	freeze	ice formation	general quantity
09/12	22/12	05/03	11/03	19	71	90

days with ice cover (freeze-up). On the Drakhtik River, continuous freeze-up forms every year, on average, lasting about 75 days. Freeze-up did not form only in 2003 and in the winter of 2003/04. The number of days with freeze-up on the Drakhtik River fluctuates between 0 and 137 days. The ice thickness at the end of the month varies: in November – from 3 to 14 cm, in December – from 4 to 24 cm, in January – from 3 to 31 cm, in February – from 2 to 34 cm. The average maximum thickness of the ice cover is 18 cm, in some cases it can reach 35 cm or more (for example, on February 15, 1976, the ice thickness was recorded at 37 cm) (Table 6). Thus, on the river in question, the ice cover is formed mainly from December, in some years – already in November, then its thickness increases until the end of February, after which it begins to decrease and completely disappears by the first ten days of March. Sometimes (in the winter periods of 1971/72, 1981/82, 1984/85) the ice cover remained until the end of March. On average, the maximum ice thickness is recorded on February 8.

Table 6

Maximum ice thickness on the river Drakhtik table is not needed for one figure

Name of the post on the river Drakhtik	Thickness ice, cm		
	maximum, cm	date	average
Drakhtik	37	15/02/1976	18

Ice growth throughout the winter depends on hydrometeorological conditions – air temperature, amount of precipitation, thickness of snow cover on ice, its density, etc. Ice growth in the studied area occurs throughout the winter until the river opens up. Over the studied time interval, the maximum ice thickness has a decreasing trend at the studied posts – k linear trend coefficient thickness of ice makes up - 3.4 cm/10 years. The thickness of the snow cover on the ice also has a downward trend. The maximum thickness of the snow cover on the ice was 23-24 cm. The distribution pattern coincides with the distribution of ice thickness.

Ice phenomena after the river breakup last on average three days and maximum – up to 10 days. The earliest date of the river breakup is February 1, 2015. The latest breakup of the river was observed on March 31, 1982. The destruction of ice phenomena occurs in late February - mid-March.

The freezing dates in the studied river shift to later dates, and the dates of the opening and ending of ice phenomena shift to earlier dates, the duration of freeze-up and ice phenomena is reduced (Fig. 5). As for the coasts, it is clearly seen from the figure that there is a shift in the dates of its beginning and end towards later dates and a slight reduction in duration. This phenomenon is natural, since due to climate change, ice cover gives way to ice banks. On the Drakhtik River, the Drakhtik water post, on average, ice banks are observed from the first ten days of November to the end of March-beginning of April – from 2 to 78 days.

Changes in ice phenomena on rivers are directly related to the dynamics of climatic conditions, mainly with the air temperature in the region [3], the tendencies towards breaking up and freezing closely correlate with the regional average temperature [17].

Conclusions. For the first time, a comprehensive study of ice phenomena on the Drakhtik River has been carried out. Climate changes observed in recent decades in the basin have affected the ice regime of the rivers. Increased winter air temperatures have accelerated the reduction in the duration of ice phenomena over the entire 50-year observation period, and the duration of ice formations has decreased.

The water level values in the Drakhtik River for the period November – March fluctuate within a small range – from 38 to 43 cm, and the water flow rate is from 0.074 to 0.22 m^3/s. The water level remains virtually unchanged from November to mid-March, after which it rises. Water flow rate decreases from November to January, after which it increases;

Every year, various ice phenomena of varying size and duration are formed on the river under study: ice banks, freeze-up, etc.; there is no spring or autumn ice drift, slush flow, ice jams or ice dams;

The duration of freezing on the Drakhtik River averages 19 days and fluctuates from 78 (2001/02) to 2 days (1983/84, 1986/87, 2023/24). The earliest date of the onset of ice phenomena is 01 November 1976, 1982, the latest - January 24, 2024. Rarely (1984, 1987) ice phenomena were observed in the last ten

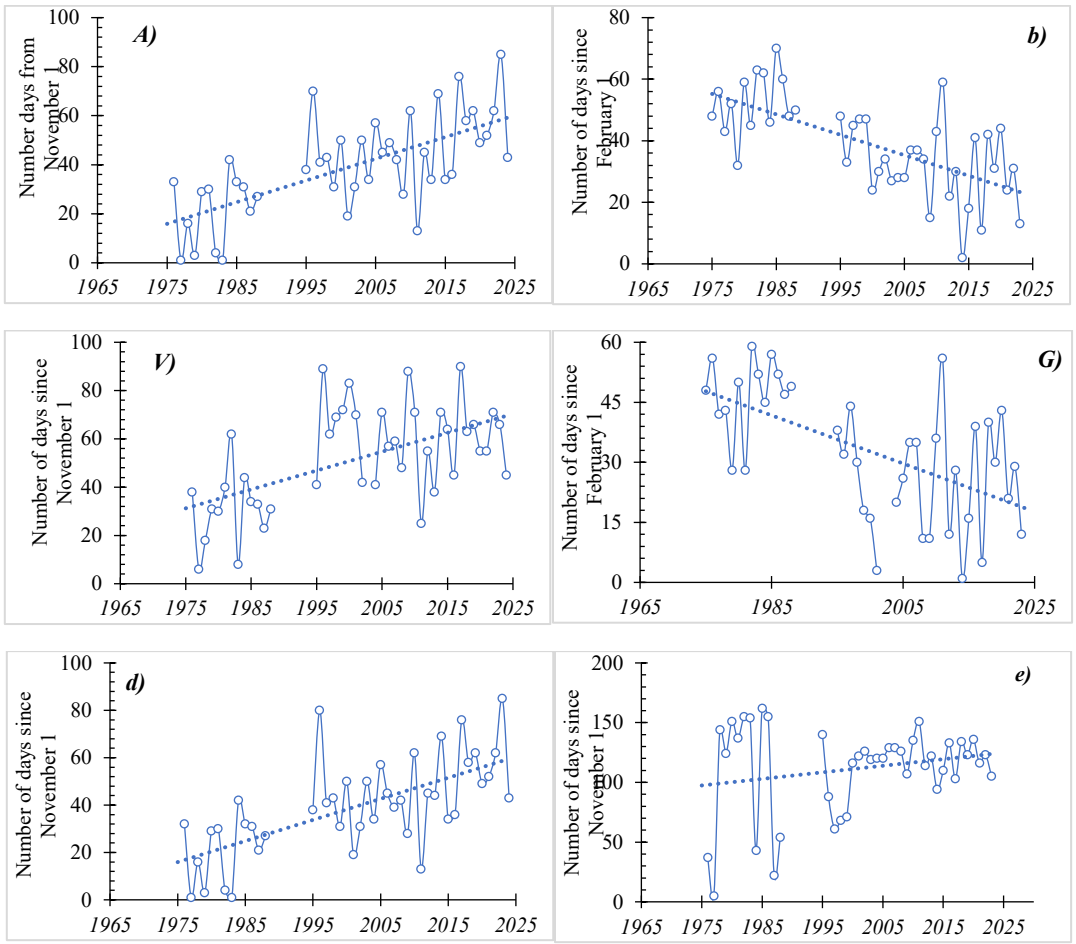


Fig. 5. Interannual changes in the onset (*a, c, d*), end (*b, d, e*) of ice phenomena (*a, b*), freeze-up (*c, d*) and ice cover (*d, e*) on the Drakhtik River – Drakhtik settlement for 1974/75 – 2023/24

days of October;

On the Drakhtik River, a continuous ice cover forms every year, which lasts on average about 75 days, fluctuating from 0 to 137 days. Ice cover It is formed mainly in December, in some years – in November and disappears by the first ten days of March. Sometimes (in the winter periods of 1971/72, 1981/82, 1984/85) the ice cover remained until the end of March;

The thickness of the ice at the end of the month varies: in November – from 3 to 14 cm, in December – from 4 to 24 cm, in January – from 3 to 31 cm, in February – from 2 to 34 cm. The average maximum thickness of the ice cover is 18 cm, in some cases it can reach 35 cm or more (for example, on February 15, 1976, an ice thickness of 37 cm was recorded);

In modern climatic conditions on the river under study, the freezing dates are shifted to later dates , and the dates of the opening and end of ice phenomena are shifted to earlier dates, the duration of ice formation and ice phenomena is reduced.

The maximum thickness of the ice cover has a steady tendency to decrease, as in other rivers. The depth of the snow cover on the ice also has a tendency to decrease. The maximum depth of the snow cover on the ice was 23-24 cm.

Changes in the timing and duration of ice phenomena on rivers are directly related to the dynamics of climatic conditions, mainly with air temperature.

Acknowledgment / **Funding**: The study was carried out with the financial support of the Science Committee of the Republic of Armenia within the framework of the scientific project 24WS-1E035.

Bibliography

1. *Маргарян, В.Г. (2020).Часові зміни зимового мінімального декадного стоку річок басейну озера Севан. Український географічний журнал, 3(111), 20–29. https://doi.org/10.15407/ugz2020.03.020*
2. *Маргарян, В.Г. (2021). Льодовий режим річок басейну Дебед, Вірменія. Лід та сніг, 61 (2), 248–261. https://doi.org/10.31857/S2076673421020086*
3. *Маргарян, В.Г., Вершинин, Д.А. (2021). Прояв змін клімату в льодовому режимі річок басейну ріки Дебед (Вірменія). Геосферні дослідження, 1, 94–103. https://doi.org/10.17223/25421379/18/8*

4. Маргарян, В.Г., Клименко, К.Г., Ткаченко, Т.Г. (2020). Просторово-часова мінливість мінімального зимового місячного стоку в річках басейну озера Севан (Вірменія). Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (52), 182–192. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-52-13
5. Gorbachova, L., Afteniuk, O., Khrystiuk, B., Lobodzinskyi, O. (2023). Trends and fluctuations of river ice regimes in the Prypiat Basin, within Ukraine. Meteorology Hydrology and Water Management. Research and Operational Applications, 11. http://dx.doi.org/10.26491/mhwm/166632
6. Confortola, G., Soncini, A., Bocchiola, D. (2013). Climate change will affect hydrological regimes in the Alps. A case study in Italy. Journal of Alpine Research, 101-3. https://doi.org/10.4000/rga.2176
7. Graf, R. (2020). Estimation of the dependence of ice phenomena trends on air and water temperature in river. Water, 12 (12), 3494. https://doi.org/10.3390/w12123494
8. Lobodzinskyi, O., Vasylenko, Y., Koshkina, O., Nabyvanets, Y. (2023). Assessing the impact of climate change on discharge in the Horyn River basin by analyzing precipitation and temperature data. Meteorology Hydrology and Water Management. Research and Operational Applications, 11. http://dx.doi.org/10.26491/mhwm/163286
9. Margaryan, V., Reshetchenko, S., Vardanyan, V., Frunzikyan, H. (2024). Trends in the 30-day minimum winter runoff of rivers flowing out of lake Sevan. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (60), 231-239. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-16
10. Melnyk, S., Loboda, N. S. (2020). Trends in monthly, seasonal, and annual fluctuations in flood peaks for the upper Dniester River. Meteorology Hydrology and Water Management. https://doi.org/10.26491/mhwm/126705
11. Snizhko, S., Bertola, M., Ovcharuk, V., Shevchenko, O., Didovets, I., Blöschl, G. (2023). Climate impact on flood changes–an Austrian-Ukrainian comparison. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 71(3), 271-282.
12. Snizhko, S., Bertola, M., Blöschl, G. (2025). Flood Frequency Analysis: Selection of Distribution Functions for Modelling Extreme Floods on Mountain Rivers. In 18th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, 1, 1-5. European Association of Geoscientists. Engineers. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510214
13. Semenova, I., Vicente-Serrano, S. M. (2024). Long-term variability and trends of meteorological droughts in Ukraine. International Journal of Climatology, 44(6), 1849-1866. https://doi.org/10.1002/joc.8416
14. Velychko, S. V., Dupliak, O. V. (2024). Evaluation of the green flood mitigation measures in urban area in the frame of the sustainable city concept. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1415, 1, 012008. IOP Publishing.
15. Velychko, S. V., Dupliak, O. V. (2025). Hydrological modelling for determining flood zones in a mountain catchment under absence of observations. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1499, 1, 01205. IOP Publishing.
16. Newton, A.M.W., Mullan, D. J. (2021). Climate change and Northern Hemisphere lake and river ice phenology from 1931–2005. The Cryosphere, 15, 2211–2234, https://doi.org/10.5194/tc-15-2211-2021
17. Prowse, T.D., Bonsal, B.R., Duguay, C.R, Lacroix, M.P. (2007). River-ice break up/freeze-up: a review of climatic drivers, historical trends and future predictions. Annals of Glaciology, 46, 443-451. https://doi.org/10.3189/172756407782871431
18. Zhang, P., Chen, G., Wang, C., Zhao, P., Li, L., Cao, J., Li, Y. (2025). Rainfall-runoff generation patterns and key influencing factors in the plain of the Taihu Lake Basin, China. Journal of Hydrology: Regional Studies, 58, 102247. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102247
19. Rajwa-Kuligiewicz, A., Bojarczuk, A. (2024). Evaluating the impact of climatic changes on streamflow in headwater mountain catchments with varying human pressure. An example from the Tatra Mountains (Western Carpathians). Journal of Hydrology: Regional Studies, 53, 101755. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101755
20. Xiang, Y., Wang, Y., Chen, Y., Zhang, Q. (2022). Impact of climate change on the hydrological regime of the Yarkant River Basin, China: An assessment using three SSP scenarios of CMIP6 GCMs, Remote Sensing, 14 (115). https://doi.org/10.3390/rs14010115
21. Schnorbus, M., Werner, A., Bennett, K. (2022). Impacts of climate change in three hydrologic regimes in British Columbia, Canada. Hydrological Processes, 28 (3). 1170-1189. https://doi.org/10.1002/hyp.9661

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

References

1. Margaryan, V.G. (2020). Temporal changes of winter minimum ten-day runoff of Sevan lake rivers basin. Ukr. geogr. Journal, 3(111), 20–29. https://doi.org/10.15407/ugz2020.03.020
2. Margaryan, V.G. (2021). Ice regime of rivers in the Debed Basin. Armenia. Ice and Snow Regime, 61, 2, 248–261. https://doi.org/10.31857/S2076673421020086
3. Margaryan, V.G. Vershinin, D.A. (2021). Manifestation of Climate Change in the Ice Regime of Rivers in the Debed River Basin (Armenia). Geospheric Research, 1. 94–103. https://doi.org/10.17223/25421379/18/8
4. Margaryan, V.G., Klymenko, K.G., Tkachenko, T.G. (2020). Spatial-temporal variability of the winter minimum monthly flow in the rivers of the Lake Sevan basin (Armenia). Kharkiv, 182–192. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv

National University. Series Geology. Geography. Ecology, (52), 182-192. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-52-13

5. *Gorbachova, L., Afteniuk, O., Khrystiuk, B., Lobodzinskyi, O. (2023). Trends and fluctuations of river ice regimes in the Prypiat Basin, within Ukraine. Meteorology Hydrology and Water Management. Research and Operational Applications, 11. http://dx.doi.org/10.26491/mhwm/166632*
6. *Confortola, G., Soncini, A., Bocchiola, D. (2013). Climate change will affect hydrological regimes in the Alps. A case study in Italy. Journal of Alpine Research, 101-3. https://doi.org/10.4000/rga.2176*
7. *Graf, R. (2020). Estimation of the dependence of ice phenomena trends on air and water temperature in river. Water, 12 (12), 3494. https://doi.org/10.3390/w12123494*
8. *Lobodzinskyi, O., Vasylenko, Y., Koshkina, O., Nabyvanets, Y. (2023). Assessing the impact of climate change on discharge in the Horyn River basin by analyzing precipitation and temperature data. Meteorology Hydrology and Water Management. Research and Operational Applications, 11. http://dx.doi.org/10.26491/mhwm/163286*
9. *Margaryan,V., Reshetchenko, S., Vardanyan, V., Frunzikyan, H. (2024). Trends in the 30-day minimum winter runoff of rivers flowing out of lake Sevan. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (60), 231-239. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-16*
10. *Melnyk, S., Loboda, N. S. (2020). Trends in monthly, seasonal, and annual fluctuations in flood peaks for the upper Dniester River. Meteorology Hydrology and Water Management. https://doi.org/10.26491/mhwm/126705*
11. *Snizhko, S., Bertola, M., Ovcharuk, V., Shevchenko, O., Didovets, I., Blöschl, G. (2023). Climate impact on flood changes–an Austrian-Ukrainian comparison. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 71(3), 271-282.*
12. *Snizhko, S., Bertola, M., Blöschl, G. (2025). Flood Frequency Analysis: Selection of Distribution Functions for Modelling Extreme Floods on Mountain Rivers. In 18th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, 1, 1-5. European Association of Geoscientists. Engineers. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510214*
13. *Semenova, I., Vicente-Serrano, S. M. (2024). Long-term variability and trends of meteorological droughts in Ukraine.International Journal of Climatology, 44(6), 1849-1866. https://doi.org/10.1002/joc.8416*
14. *Velychko, S. V., Dupliak, O. V. (2024). Evaluation of the green flood mitigation measures in urban area in the frame of the sustainable city concept. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1415, 1, 012008. IOP Publishing.*
15. *Velychko, S. V., Dupliak, O. V. (2025). Hydrological modelling for determining flood zones in a mountain catchment under absence of observations. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1499, 1, 012052. IOP Publishing.*
16. *Newton, A.M.W., Mullan, D. J. (2021). Climate change and Northern Hemisphere lake and river ice phenology from 1931–2005. The Cryosphere, 15. 2211–2234, https://doi.org/10.5194/tc-15-2211-2021*
17. *Prowse, T.D., Bonsal, B.R., Duguay, C.R, Lacroix, M.P. (2007). River-ice break up/freeze-up: a review of climatic drivers, historical trends and future predictions. Annals of Glaciology, 46, 443-451. https://doi.org/10.3189/172756407782871431*
18. *Zhang, P., Chen, G., Wang, C., Zhao, P., Li, L., Cao, J., Li, Y. (2025). Rainfall-runoff generation patterns and key influencing factors in the plain of the Taihu Lake Basin, China. Journal of Hydrology: Regional Studies, 58, 102247. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102247*
19. *Rajwa-Kuligiewicz, A., Bojarczuk, A. (2024). Evaluating the impact of climatic changes on streamflow in headwater mountain catchments with varying human pressure. An example from the Tatra Mountains (Western Carpathians). Journal of Hydrology: Regional Studies, 53, 101755. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101755*
20. *Xiang, Y., Wang, Y., Chen, Y., Zhang, Q. (2022). Impact of climate change on the hydrological regime of the Yarkant River Basin, China: An assessment using three SSP scenarios of CMIP6 GCMs, Remote Sensing, 14 (115). https://doi.org/10.3390/rs14010115*
21. *Schnorbus, M., Werner, A., Bennett, K. (2022). Impacts of climate change in three hydrologic regimes in British Columbia. Canada, Hydrological Processes, 28 (3). 1170-1189. https://doi.org/10.1002/hyp.9661*

Льодовиковий режим річки Драхтик (басейн озера Севан) в умовах зміни клімату

Вардуі Маргарян [1]
к. геогр. н., доцент кафедри фізичної географії та гідрометеорології,
[1] Єреванський державний університет, Єреван, Вірменія;
Світлана Решетченко [2]
к. геогр. н., доцент кафедри фізичної географії та картографії,
[2] Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, Україна;
Святослав Дмитрієв [2]
аспірант кафедри фізичної географії та картографії

Робота висвітлює результати досліджень просторово-часових особливостей льодового режиму річки Драхтик, яка відноситься до басейну озера Севан. Основою проведених досліджень є фактичні ряди спостережень за метеорологічними, кліматичними та водним режимами за період з 1956-1957 рр. по 2024-2025 рр. «Центру гідрометеорології і моніторингу» ГНКО Міністерства навколишнього середовища Республіки Вірменія на представленій річці в районі населеного пункту Драхтик та польові дослідження. Отримані результати характеризують особливості формування льодових явищ на досліджуваному періоді, особливо привертають увагу процеси замерзання (скресання льоду) річки Драхтик, що впадає в озеро Севан. Часовий аналіз характеристик льодового режиму досліджуваної річки вказує на тенденцію до зменшення шару льоду в часі його існування. Зафіксовано зменшення тривалості та утворень льодових явищ на річці. На досліджуваних гідрологічних постах річки Драхтик дати замерзання та дати скресання льоду залишаються майже без змін. Виявлені залежності впливу коливань температури повітря на показники формування льодових явищ на представленій річці. Особливо це є характерним для зимових температурних коливань, які відбиваються на параметрах льодового режиму річки. Отримані результати дають можливість визначити основні зміни в умовах формування льодового режиму річки, що дозволить враховувати під час планування та організації гідротехнічних заходів, та надалі поглиблювати дослідження льодового режиму річок даної території з метою зменшення матеріальних збитків будь-якої економічної діяльності. Отримані результати є вагомим внеском у вивчення регіональних змін щодо умов утворення льодового режиму, що відбуваються на тлі тенденцій змін температурних показників, та можуть допомогти виявити більш тривалі довгострокові зміни режиму річки.

Ключові слова*: льодові явища, температура повітря, замерзання, льодостав, атмосферні опади, рівень води, витрати води, річка Драхтик.*

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу
Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 31 серпня 2025 р.
Прийнята 3 жовтня 2025 р.

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-22
UDC 551.501;551.508
Received 1 May 2025
Accepted 18 June 2025

The analysis of the dependence of characteristics elements of snow on orography on the northeastern slope of the Greater Caucasus

Matanat Musayeva [1]
PhD (Geography), Associate Professor,
[1] Sumgait State University, Sumgait, Azerbaijan,
e-mail: musaeva.matanat@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-2609-5582;
Jamal Huseynov [2]
PhD (Geography), Senior Lecturer,
[2] National Aviation Academy, Azerbaijan Airlines JSC, Baku, Azerbaijan,
e-mail: camal_huseynov_88@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7878-578X;
Mahmud Suleymanov [2]
PhD (Geography), Senior Lecturer,
e-mail: mahmud-suleymanov@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-0515-6737

ABSTRACT

Problem definition. Currently observed global warming is manifesting its effects, as in all regions, on the northeastern slope of the Greater Caucasus. Specifically, the increase in air temperature has caused changes in the elements of the snow cover in the area. The spatial-temporal distribution of snow cover elements, snow cover formation and melting dates, and changes in snow-covered days have been analyzed in the study area.

Formulation of the purpose. The research was conducted to determine the variation of snow cover elements depending on orography on the northeastern slope of the Greater Caucasus.

Research methods. During the analysis, stationary data on snow cover depth collected from 1964 to 2018 at the Khachmaz, Quba, Khaltan, Altiaghach, Giriz, and Khinalig hydrometeorological stations, as well as snow survey route data for the Gusarchay basin from 1986 to 2019, were used. The research was conducted using comparative and mathematical-statistical methods, along with the StokStat software. Here, the relationship between absolute elevation and snow cover duration was assessed, and it was determined that the number of snow-covered days exhibits greater persistence with increasing altitude.

The main material. The analysis determined that on the northeastern slope of the Greater Caucasus, in the period after 1990, while the height of the snow cover increased with rising air temperature, its density decreased. Furthermore, the formation and melting dates of the snow cover underwent variability compared to earlier years (before 1990). This process, as in all areas in recent years, is related to the increase in air temperature and changes in the zero isotherm in the study area.

Conclusions. The analysis established that in the upper zones, the passage of the zero isotherm is observed 15-20 days after the average snow cover formation date. In spring, it was determined that snow begins to melt 25-30 days after the temperature crosses zero degrees. On the northeastern slope above 1500 m, the average ten-day snow height varies between 10-25 cm, the maximum height between 15-30 cm, and the extreme height between 30-100 cm. The change in snow line elevation occurs intensively during winter, which is related to periodic temperature rises, with maximum snow height occurring in late February and early March. The research results can be used for water resource assessment, water management planning, and developing specific measures considering the impact of climate change on water resources.

Keywords*: snow characteristic elements, orography, snow cover, northeastern slope, variability of climatic factors, altitude, phenological characteristics of snow, sub-balance elements, snow reserves.*

In cites: Musayeva Matanat, Huseynov Jamal, Suleymanov Mahmud (2025). The analysis of the dependence of characteristics elements of snow on orography on the northeastern slope of the Greater Caucasus. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 289-299. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-22

Problem definition. In modern climate change conditions, the characteristics of seasonal snow cover are changing significantly. In recent decades, as in many countries, in Azerbaijan the area of snow cover during transitional seasons is decreasing and its formation periods are shortening. However, the observed trends are often multidirectional and spatially heterogeneous [29, 31]. Additionally, recent research shows that when studying both temporal and spatial heterogeneity, discrepancies between main sources of snow cover data (ground-based, remote sensing, modeling) remain high.

In the study area, the most significant differences in measurements are observed between snow survey routes near meteorological stations, in open areas, and in forested areas. Snow accumulation coefficients are also decreasing - the ratio between snow reserves in forested and open areas is explained in some cases by the reduction in snow transported by snowstorms.

Snow survey observations along routes at HMS (Hydrometeorological Stations) represent the most important data source for studying long-term patterns and verifying other snow cover data sources (models, remote sensing). The use of different sources often yields divergent results when analyzing long-term trends. Snow cover observations at HMS are measurements taken only at specific near-

© Musayeva Matanat, Huseynov Jamal, Suleymanov Mahmud, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

by points, representing small areas with largely unknown characteristics. Observations at specific points may differ significantly from average values even in small river basins, and areas where values are close to average levels are randomly distributed.

Analysis of recent research. The formation of spring-summer river flows and the hydrograph pattern of high-water periods primarily depend on snow water equivalent. The study area's complex topography, with elevation varying across wide ranges and mountain ridges exposed to air masses of different humidity levels, creates conditions for complex spatial distribution of both snow cover and its water equivalent. To determine the role of snow cover in streamflow formation in northeastern slope rivers, multi-year snow survey route data were used. Research on spring flood formation and forecasting has examined the role of snow water reserves in basins, with assessments reflected in studies by S. Rustamov, V. Somaya, G. Khmaladze, A. Vajnov, Sh. Agayev, R. Mahmudov, M. Musayeva, J.S. Huseynov and other researchers.

Unlike previous authors, in this article the assessment of snow cover parameters for the study area is carried out using ground-based, remote sensing methods, and in recent years, various modeling methods used in America and some European countries to conduct a comparative analysis of basin and stationary observation data, taking into account the intra-annual and spatial (intra-basin) variability of snow cover parameters. The results reviewed here are in good agreement with studies assessing the representativeness of SNOTEL snow storage monitoring stations in North America for their surrounding areas [17, 18]. Only about half of the SNOTEL stations were shown to be within 10% of the average snow depth in their surrounding area. In addition, errors, as a rule, do not depend on the distance from the stations, but are associated with the characteristics of the surrounding area: absolute heights, insolation, and the nature of vegetation. Given the strong spatial heterogeneity of snow cover parameters and the limited use of point data, it is most optimal to use methods of assimilating data from various sources - ground, remote and model. A review of these methods is given in [8].

Highlighting previously unsolved parts. In recent years, rising air temperatures in high-altitude areas have led to decreased snow cover density and water content. Additionally, the elevation of the snow line during winter fluctuates sharply due to frequently recurring temperature increases. Such temperature rises can affect areas up to 2200-2300 m elevation, with diminishing impacts at higher zones.

Snow cover formation and melting dates have become more variable compared to previous years (pre-1990). This variability, observed recently across the study area as elsewhere, relates to shifts in the zero isotherm caused by rising air temperatures. Previous studies had not established relationships between absolute elevation and number of snow cover days. Moreover, due to insufficient data, the exact dependence of snow cover duration on increasing elevation remained unclarified in earlier research.

Formulation of the purpose. The main objective of the research is to study the dependence of the main parameters of snow cover on orography on the northeastern slope of the Greater Caucasus. Particular attention was paid to the variation of snow cover elements depending on altitude in the area. Taking into account the impact of changing climatic factors in the study area, the current state of the altitudinal variation characteristics of snow cover parameters was analyzed.

Research methods. The study area covers the northeastern slope of the Greater Caucasus, which is the highest mountainous region of Azerbaijan. The research utilized stationary snow depth data collected from 1964 to 2018 at the Khachmaz, Quba, Khaltan, Altiaghach, Giriz and Khinalig hydrometeorological stations of the National Hydrometeorology Department located on the northeastern slope of the Greater Caucasus, as well as snow survey route data from the Gusarchay basin for 1986-2019. The analysis of snow cover parameters is based on expedition data, long-term observational data and their comparison, application of mathematical-statistical methods, and the use of the StokStat software.

The main material. In lowland basins, interannual differences in winter snowfall, combined with varying intensities of snowstorm transport, cause an increase in discrepancies between stationary and basin data. Our research shows that our country has a tendency to increase the depth of snow cover, and the average trend of its maximum thickness is 0.8 cm per 10 years. Against the background of the tendency to increase the thickness of the snow cover, the duration of the formation of the snow cover, its density, humidity and the area occupied by the snow cover consistently decrease. On average, the decrease in the number of days with snow cover is -1.01 days/10 years. The most significant differences in the direction of trends are observed between measurements near meteorological stations, on snow measuring routes in open and forested areas [1,16,30]. Snow reserves also constantly decrease on forest routes (-1.19 mm/10 years). Snow accumulation coefficients also decrease, so the ratio of snow reserves in forested and open areas is partly explained by a decrease in the amount of "snow drift" (wind drift). Thus, the snow reserves measured in “open areas” (non-forest areas, according to the HMS data) are potentially close to the

average snow reserves in open areas (along the route) in the river basin, and their relative errors of the average values were considered representative, less than 10%.

In any area, the formation of snow cover, its duration, melting intensity, distribution characteristics, and generally its role in river nourishment largely depend on complex physical-geographical factors, including the orographic features of the area [4, 11]. Taking this into account, the formation characteristics of snow cover at different elevations depending on vertical zonality were studied in the research area, and statistical analyses of stationary and special snow survey route data were conducted. To determine the variation characteristics of snow cover depending on altitude (comparatively for 1964-1990 and 1991-2018 [30], a graphical relationship (R=0.87, R=0.78) was established between absolute elevation and snow cover height (Figure 1). The deviation of some points from the main trend of the correlation curve is explained by the location characteristics of snow measurement points on slopes of different aspects in the area, and by the predominant influence of one or another factor. The correlation graph clearly demonstrates that snow cover height is greater in protected areas compared to open areas. However, the difference in snow cover height between these two areas is not uniform. The most significant difference is observed above the permanent snow cover zone (1000 m). The increase in snow cover height with elevation is not consistent across all zones, being most pronounced in mid- and high-mountain zones. On the northeastern slope, the snow cover is not particularly thick. In areas near the Caspian Sea, snow cover height reaches up to 10 cm.

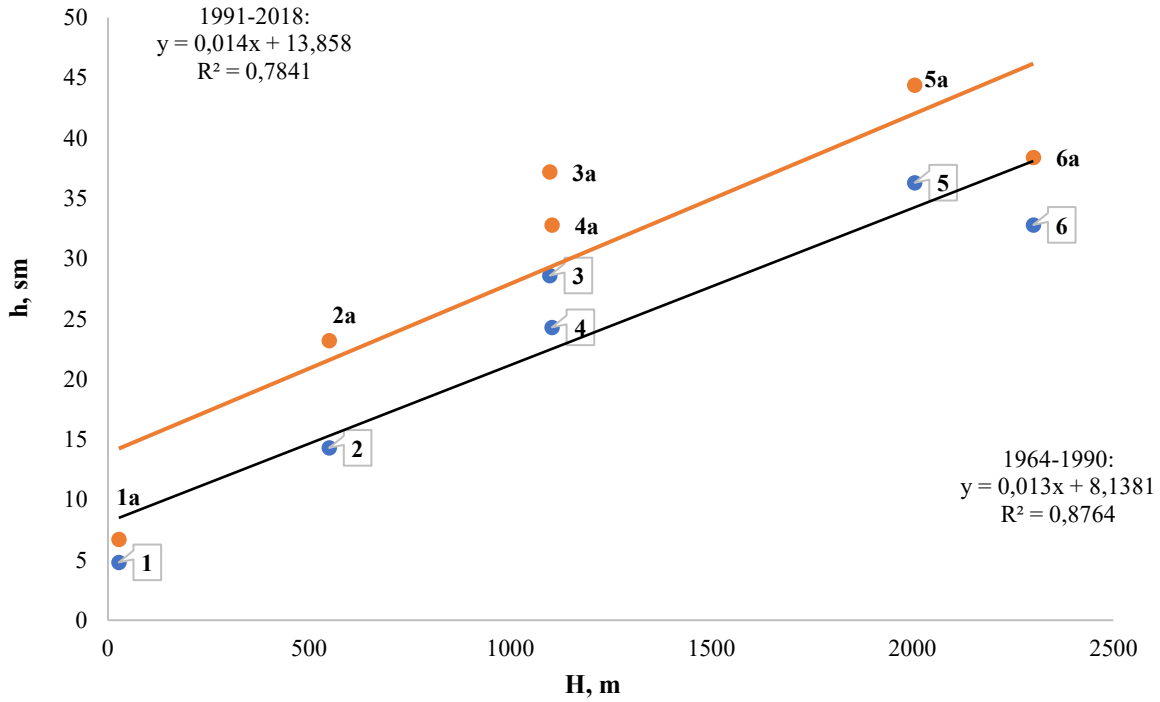


Fig. 1. Variation of snow cover height depending on elevation on the northeastern slope of the Greater Caucasus (1,1a-Khachmaz; 2,2a-Quba; 3,3a-Khaltan; 4,4a-Altıağac; 5, 5a-Qırız; 6, 6a-according to Khinaliq stationary data, "1-6" - winter precipitation of 1964-1990, "1a-6a" - winter precipitation of 1991-2018)

As seen in Figure 1, in the study area over the past 30 years, snow depth has increased compared to the period before 1990. With increasing elevation, snow cover thickness also increases. However, unlike the southern slope, this increase occurs much more slowly here. Up to 1500 m elevation, snow depth increases by 0.8 cm per 100 m; up to 2200 m this increase constitutes 2-3 cm. At higher elevations, the gradient reaches 5 cm. In the mid-mountain zone, at the meteorological station located at 1000-1200 m elevation, snow cover with a height of 10-12 cm predominates throughout the winter. At 1900-2000 m elevation, over the multi-year period, snow cover height shows minimal increase, varying between 15-20 cm. The absence of a clearly noticeable maximum at the Giriz high-mountain station is most likely related to the influence of the foehn wind. According to B. Pikhtinova (1958), the recurrence of foehn during the cold season is 103 days. The low snow cover height at this station can also be explained by the influence of the foehn present here [2, 3].

On the northeastern slope, despite generally low snow cover height, in certain extreme years its height can increase significantly. The maximum snow height on the northeastern slope is typically

recorded between late December and early January. The average ten-day maximum snow height on the northeastern slope forms approximately 2 months earlier compared to the southern slope [15, 19]. This can be explained by the northeastern slope being more exposed to the influence of cold air masses arriving from the north.

Snow cover height increases with elevation. However, the rate of increase is not uniform across all elevation zones. In relatively lower zones, the increase is weak, while at higher elevations it becomes more intense. This is explained by the fact that with increasing elevation, due to temperature conditions, a greater portion of annual precipitation falls in solid form (snow) and winter duration lengthens.

The multi-year analysis of snow measurements taken along the route in March shows that in the Gusarchay basin, compared to previous years (before 1990), snow height (h, cm) has significantly increased across elevations, with only a slight decrease observed at 2020 m. It has been determined that during 1991-2019, snow height across elevations in this area was greater than during the pre-1990 period. However, while snow density was higher in the pre-1990 period, its water equivalent has relatively decreased in the post-1990 periods.

The timing of snow cover formation and melting varies depending on elevation. Specifically, persistent snow cover is observed at 3600-4000 m in mid-September, at 1900-2500 m in late October, and at 1500-1600 m in mid-November. At these elevations, the melting of persistent snow cover occurs in late June, early July, and February-March respectively.

In mountainous regions, the frequent recurrence of sub-zero temperatures prevents recently fallen snow from melting quickly. Thus, successive snowfalls accumulate layer upon layer, forming thick snow cover [1,10,16]. In high mountain zones, under unfrozen soil conditions, snow melting occurs due to solar radiation on the snow surface and the soil's own heat. Beginning in early spring, rising air temperatures intensify the snowmelt process. During this period, melting begins fastest in areas with lower snow density. The formation date of snow cover also changes with increasing elevation.

To determine the characteristic dependence of snow cover formation date on absolute elevation, a correlation graph was established between these two elements. The average snow cover formation date in the period after 1985 is delayed by several days compared to the months of the period before 1985. The snow cover formation and melting dates and duration are determined by the thermal regime of the area. As the number of days with negative temperatures increases, the number of snow-covered days also increases. This characteristic can be clearly seen from the graphs showing the changes in the zero isotherm and snow cover formation and melting dates depending on elevation (Figures 2-3).

In the foothill zone, snow cover formation and the zero isotherm hardly coincide. At higher elevations, the passage of the zero isotherm is observed 15-20 days after the average snow cover formation date. In spring, the opposite occurs: snow begins

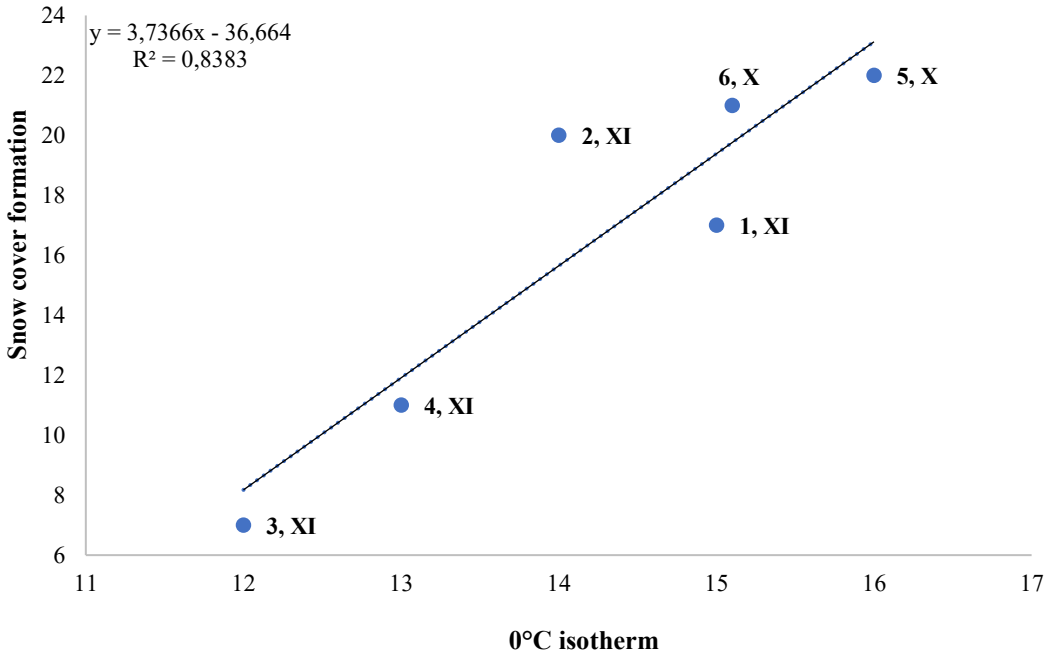


Fig. 2. Correlation graph between the zero isotherm and snow cover formation date (day of month) (1992-2018). *The graph shows:*
1-Altiaghach, **2**-Khaltan, **3**-Khachmaz, **4**-Guba, **6**-Giriz, **5**-Khinalig, **X**, **XI** - indicate months

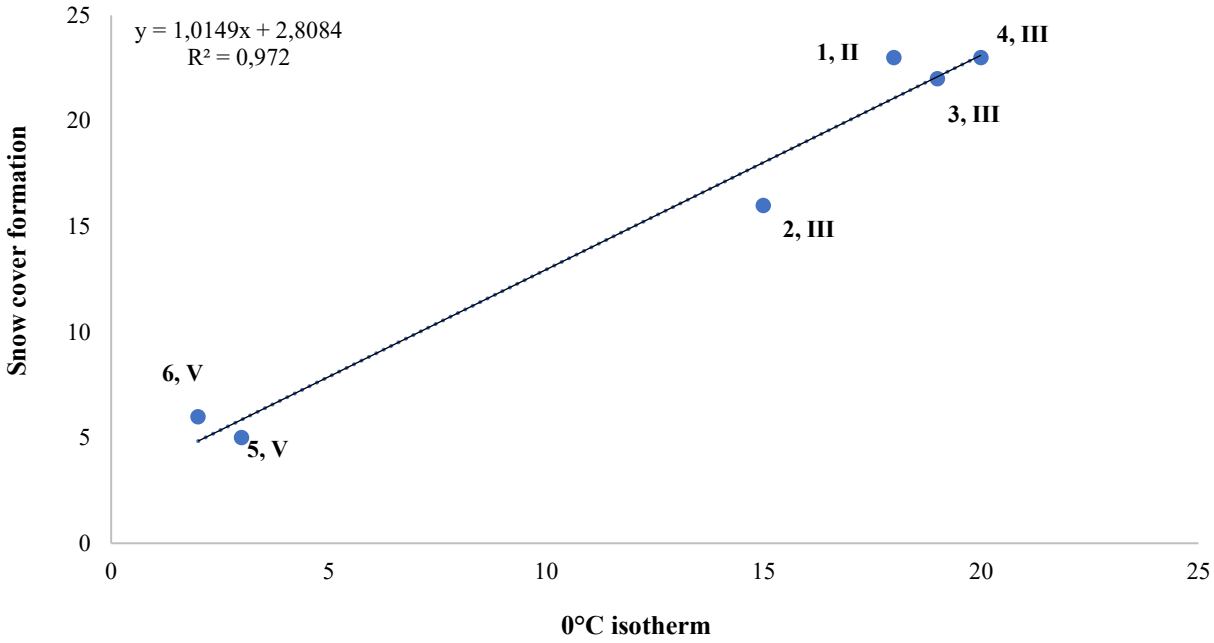


Fig. 3. Correlation graph between the zero isotherm and snow cover formation date (day of month) (1992-2018). *The graph shows:*
1-Giriz, **2**-Altiaghach, **3**-Khaltan, **4**-Khinalig, **5**-Khachmaz, **6**-Guba, **II, III, V** - indicate months

melting 25-30 days after air temperature crosses above 0°C (Figure 4). On the northeastern slope's Shahdag, Tufan, and Babadag peaks, snow typically falls in early September [5, 9, 16].

In regions below this elevation, snow cover formation is gradually delayed due to higher temperatures. On the northeastern slope, exposed to cold air masses, snow cover forms earlier compared to the southern slope. At Giriz (2000 m), snow cover typically forms in the third 10-day period of October, while at 1000-1200 m elevation, it forms on November 1. In the mountains, as elevation increases, the snow cover formation period gradually decreases, averaging 2.5-3 months in mid-mountain zones and 2.5 months in high-mountain zones.

The snow cover melting process progresses from

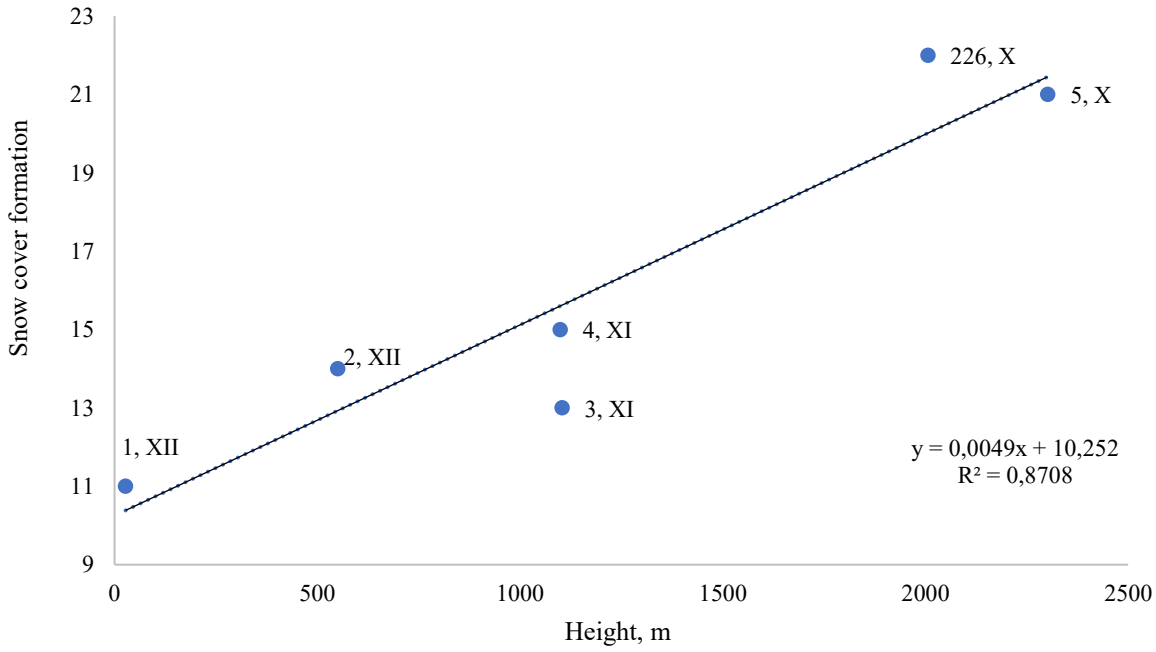


Fig. 4. Correlation graph between average snow cover formation date and absolute elevations (Long-term data: 27 m - Khachmaz, 550 m - Guba, 1099 m - Altiaghach, 1104 m - Khaltan, 2006 m - Giriz, 2301 m - Khinalig)

below (lowlands) upwards. Consequently, the snow melting date is delayed with increasing elevation.

The nature of surface cover plays a significant role in the snowmelt process. In forested areas, snow cover melts much later compared to non-forested areas. Snow cover melting concludes in lowland regions by late February to early March, and in foothill regions during March.

The elevation of the permanent snow line on the northeastern slope is 1000-1150 m. This is explained by the area being under the influence of cold air masses [2, 26, 28]. The lower boundary of permanent snow cover corresponds to the limit of unmelted snow cover lasting at least one month and is observed during most of the winter season. In mountainous regions, the timing of permanent snow cover formation mainly depends on the thermal regime and amount of winter precipitation. To demonstrate the variation characteristics of snow-covered days depending on thermal regime features, a correlation graph was established between these two elements. As seen from the correlation graph, the number of snow-covered days (N) increases with the number of days having average temperatures below 0°C (t). The equation of this relationship is given in Figure 5. N=0.8981t+1.3077 (1.1)

According to the equation (1.1), calculating the number of snow cover days requires only knowing the number of days with average temperature below 0°C. The quantity obtained by this method can be used for reporting purposes.

The analysis and research results have establi-

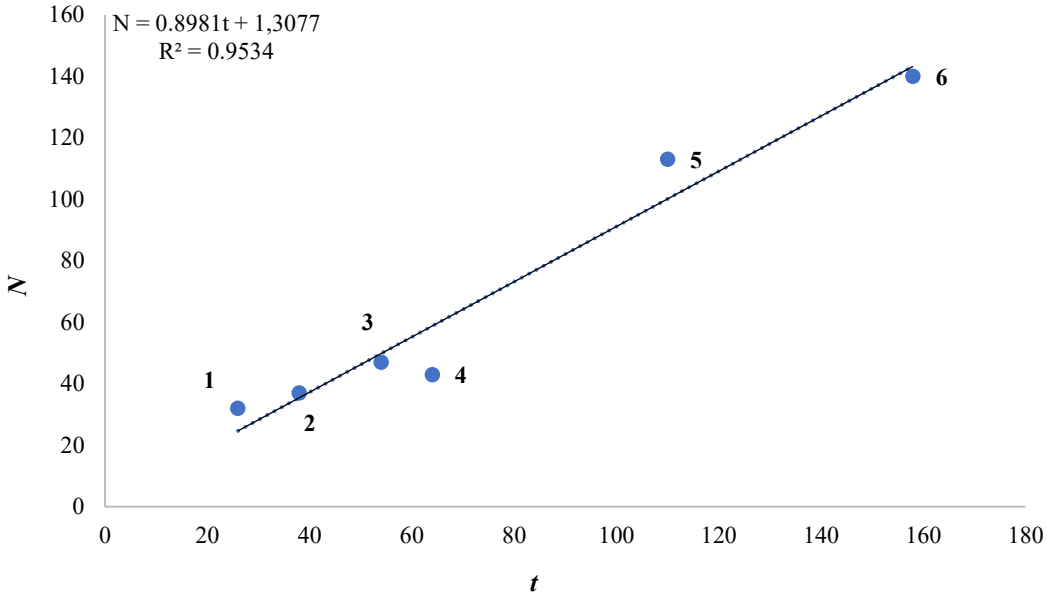


Fig. 5. Correlation between the number of snow cover days and the number of days with average temperature below 0°C in the northeastern region of the Greater Caucasus.
The graph shows: **1**-Khachmaz, **2**-Guba, **3**-Altiaghach, **4**-Khaltan, **5**-Giriz, **6**-Khinalig;
N **-** number of snow cover days, ***t*** **-** number of days with average temperature below 0°C

shed the existence of a correlation curve between the number of snow cover days (*N*) and elevation (*H*) in the northeastern region of the Greater Caucasus. As seen from the correlation curve, snow cover duration increases with absolute elevation (Figure 6).

The analysis of graphs clearly shows that snow cover duration and maximum height vary depending on elevation and time. On the northeastern slope, where snow cover is less than on the southern slope, isohyets are drawn at intervals of 5 cm for average ten-day height, 10 cm for maximum height, and 25 cm for extreme height [14, 15, 29]. Above 1500 m on the northeastern slope, the average ten-day snow height ranges from 10-25 cm, maximum height from 15-30 cm, and extreme height from 30-100 cm.

To determine the influence of terrain roughness on snow cover elements in the area, comprehensive profiles were developed [4, 6]. These reflect corresponding variations along longitudinal profiles of snow survey routes. The average trend line of snow height variation closely matches the longitudinal profile of the route. Intensive increases in snow water equivalent are observed in zones where terrain roughness significantly increases. In zones with less terrain roughness, snow water equivalent increases only slightly with elevation. The uneven distribution of snow cover in Azerbaijan's territory is not always solely dependent on uneven precipitation distribution, absolute elevation, or terrain roughness. Undoubtedly, the uneven distribution of snow cover depends on wind speed, duration and direction, variable snowmelt intensity during periodic temperatu-

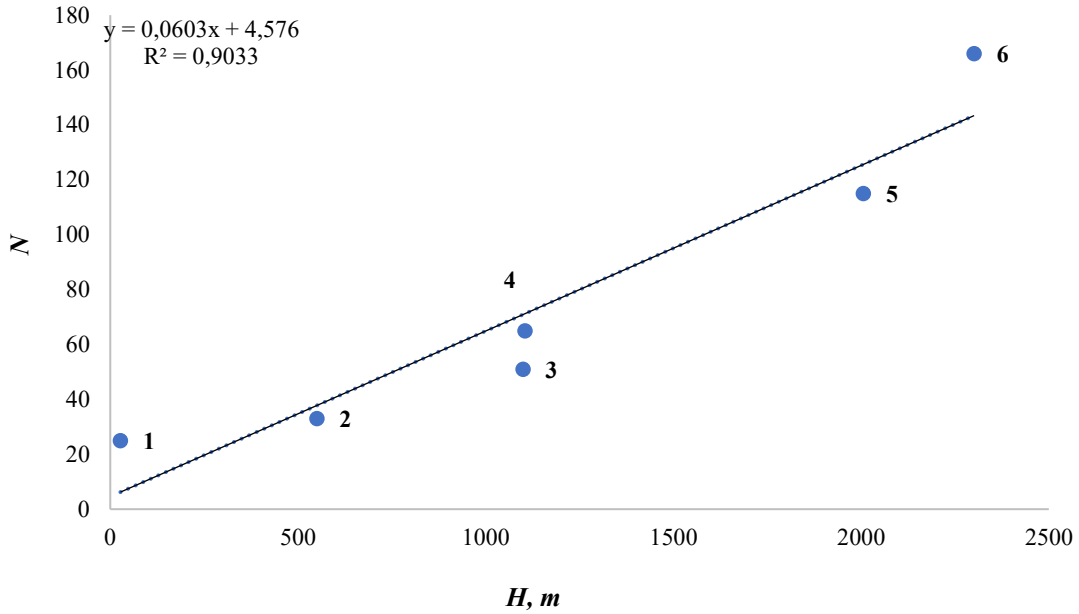


Fig. 6. Variation of snow cover duration depending on elevation on the northeastern slope of the Greater Caucasus (**1**-Khachmaz, **2**-Quba, **3**-Altiaghach, **4**-Khaltan, **5**- Giriz, **6**-Khinalig)

re increases, snow cover structure and thickness, vegetation cover, and other influencing factors [10, 12, 13].

The transport of soft and fresh snow from one place to another occurs when wind speed exceeds 2.4 m/s, and sometimes even 1.5 m/s. Snow cover is distributed more evenly in forested areas, which is related to reduced wind impact there. Therefore, the greatest snow height amplitude is observed in non-forested areas. In non-forested areas, the height amplitude varies between 10-20 cm. Here, the snow cover unevenness coefficient (K) fluctuates between 4.0-5.0.

Analysis of data obtained from snow survey routes shows that in forest zones, snow cover distribution is relatively uniform and changes gradually with increasing elevation. This pattern is clearly visible in the comprehensive diagram above. Fluctuations in snow height amplitude are more pronounced in non-forested areas. Above the forest zone (2200 m), the minimum snow height amplitude ranges 0.1-0.2 cm, while the maximum ranges 2.0-3.0 cm.

The variability of snow cover elements on the northeastern slope of the Greater Caucasus is explained by changes in physical-geographical, primarily meteorological factors. Due to variations in atmospheric elements - particularly air temperature and precipitation patterns - snow cover characteristics exhibit year-to-year variability [4, 7, 10, 20]. To quantify this variability, statistical parameters of snow cover characteristics were calculated for the study area using both snow survey route data and stationary snow measurement data.

In the study area, the coefficient of variation (C_v) of snow cover ranges between 0.40-0.73. To determine the altitudinal variation pattern of C_v and quantify its expression, a C_v=f(H) relationship was established. In relatively low-elevation areas, C_v changes intensively, while in high-elevation areas it changes gradually. In areas up to the foothill zone, the coefficient of variation ranges between 0.52-0.73, whereas in the permanent snow cover zone this value decreases to 0.46-0.40. This decrease in C_v results from the weakening influence of positive temperatures on snow cover formation with increasing elevation, causing the coefficient of variation values to fluctuate across a wider range in lower elevation areas.

The correlation curves based on snow survey route data also fully reflect this characteristic [23, 24]. Using these data, the variation coefficient of snow water equivalent (C_{vw}) was calculated. The variation coefficient of snow water equivalent follows the same altitudinal pattern [15]. However, in most cases, the C_{vw} value is smaller than the variation coefficient of snow depth (C_v).

The extreme value of the variation coefficient of snow water equivalent is greater than that of the variation coefficient of snow depth. Specifically, the C_v of snow water equivalent ranges between 0.34-0.92. The C_v of snow density has smaller values than those of snow depth and water equivalent, varying between 0.27-0.57. This characteristic was also identified in research conducted by M.Musayeva [15, 16].

Thus, while in previous years the northeastern slope was characterized by greater snow depth with relatively small density variations, in the last 30 years all three elements have undergone significant

variability. The error for all three elements is determined by the following formula:

$$n=\frac{C_v^{\,2}10^4}{\sigma^2}; \qquad (1.2)$$

The asymmetry coefficient (Cs) is closely related to the variation coefficient (C_v). The established relationships for both parameters confirm this. These relationships were developed based on both stationary and snow survey route observation data. In most cases, the relationship showing the asymmetry coefficient and variation coefficient of snow density forms a second correlation that lies slightly above the general trend of points representing the variation coefficients of snow depth (C_v (h)) and snow water equivalent (C_v (w)).

In practical calculations, it is advisable to use the ratio Cs=2Cv, as this curve better fits the empirical data points. Calculating the variation coefficient allows determining different probability percentiles of snow cover characteristics. It should be noted that in practical applications, the 1% probability snow cover characteristics are most frequently used. The 1% probability snow depth exceeds the long-term average value by 2-4 times. For example, at Giriz station, while the average snow depth is 8.3 cm, the 1% probability value is 19 cm; similarly at Khaltan station, the 7.6 cm average corresponds to a 1% probability value of 19 cm. Based on snow survey route data, snow depths across elevations range 22-39 cm, while the 1% probability values reach 65-125 cm. These extreme values occur once every 100 years. The same pattern is observed for snow density. While the long-term average snow density in the Gusarchay basin ranges 0.21-0.26 g/cm³, the 1% probability value equals 0.32-0.47 g/cm³.

Regarding snow water equivalent, its average value ranges 45-101 mm. At 1% probability, this value varies between 110-440 mm.

Conclusions. In the northeastern slope of the Greater Caucasus under modern climate change conditions, the study of air temperature rise impacts on snow cover elements has yielded the following key results:

1. In the study area, due to rising air temperatures over the last 30 years compared to the pre-1990 period, snow height has increased while snow density has decreased.

2. Compared to previous periods, the zero isotherm passage now occurs 15-20 days after the average snow cover formation date (with a 3-4 day delay).

3. Currently, snow begins melting 25-30 days after air temperature crosses above 0°C (4-5 days earlier than in the pre-1990 period).

4. The study confirmed the existence of a correlation curve between the number of snow cover days and elevation in the research area.

For the first time in the northeastern slope of the Greater Caucasus, a comparative analysis of snow elements was conducted relative to the pre-1990 period, revealing changes in snow cover formation and melting dates in recent decades compared to earlier years, along with determining the elevation of the permanent snow line in recent years. Considering the study's results, they can be utilized in measures to mitigate the negative impacts of climate change on the area's snow-ice cover and water resources. Given that the melting of glaciers affected by climate change on higher peaks of the study area and changes in snow cover parameters will lead to water scarcity in the future, it is recommended to consider the research findings in developing preventive measures, particularly for forecasting river water availability. The use of this data holds significant importance for this region, which is considered a recreational area.

Bibliography

1. *Budaqov, B. Ə. (1965). Azərbaycanın Böyük Qafqaz hissəsinin müasir və qədim buzlaşması. Bakı, AMEA-nın nəşriyatı, 157.*
2. *Hartl, L., Helfricht, H., Waldhuber, M. S., Seiser, B., & Fischer, A. (2022). Classifying disequilibrium of small mountain glaciers from patterns of surface elevation change distributions. Journal of Glaciology, 68(268), 253–268. https://doi.org/10.1017/jog.2021.90*
3. *Helevera, O., Mostipan, M., & Topolnyi, S. (2023). Winter and spring long-term dynamic of air temperature in Central Ukraine. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology," (59), 83–94. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-07*
4. *Huseynov, J. S., Tagiyev, A. Sh., & Balammadov, Sh. R. (2024). Characteristics of air temperature on the southern and southeastern slopes of the Greater Caucasus in the modern period. Journal of Geology, Geography and Geoecology, 33(3), 475–484. https://doi.org/10.15421/112444*
5. *Huseynov, J. S., Huseynova, T. M., & Tagiyev, A. Sh. (2025). Assessment of the impact of climate changes on the quality of life of the population in the Greater Caucasus region of the Republic of Azerbaijan. Journal of Geology, Geography and Geoecology, 34(1), 100–111. https://doi.org/10.15421/112510*
6. *Ismayılov, R., & Suleymanov, F. (2024). Water resilience under climate change in Azerbaijan. Geojournal of Tourism and Geosites, 53(2), 677–686. https://doi.org/10.30892/gtg.53231-1243*
7. *Jezdibayeva, B. T., & Mamytova, A. T. (2021). Study of snow cover in the territory of the Ural (Jayik) River Basin. 2021, (4), 29–37. https://doi.org/10.54668/2789-6323-2021-103-4-29-37*

8. Largeron, C., Dumont, M., Morin, S., Boone, A., Lafaysse, M., Metref, S., Cosme, E., Jonas, T., Winstral, A., & Margulis, S. A. (2020). Toward snow cover estimation in mountainous areas using modern data assimilation methods: A review. Frontiers in Earth Science, 8, 325. https://doi.org/10.3389/feart.2020.00325
9. Məmmədov, R. M. (Ed.). (2015). Azərbaycan Respublikasının Coğrafiyası, Fiziki Coğrafiya. Bakı, Avropa, 530.
10. Mammadov, R. M., Safarov, S. H., & Safarov, E. S. (2009). Current changes of the atmospheric precipitation regime on the territory of Azerbaijan. Geography and Natural Resources, 30(4), 403–407. https://doi.org/10.1016/j.gnr.2009.11.018
11. Mammadova, L., Negri, S., Tahmazova, M.-K., & Mammadov, V. (2024). A Hydrological and Hydrochemical Study of the Gudiyalchay River: Understanding Groundwater–River Interactions. Water, 16(17), 2480. https://doi.org/10.3390/w16172480
12. Miroslav, K., & Donald, R. N. (2015). Soil regulates the circulation of water on the planet Earth. In Soil, the skin of the planet Earth (137–158). Dordrecht: Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9789-4_10
13. Miara, A., Macknick, J. E., Vörösmarty, Ch. J., Tidwell, V. C., Newmark, R., & Fekete, B. (2017). Climate and water resource change impacts and adaptation potential for US power supply. Nature Climate Change, 7(11), 793–798. https://doi.org/10.1038/nclimate3417
14. Mənsimov, M. R., & Musayeva, M. A. (2021). Böyük Qafqazın cənub yamacının öyrənilməmiş çaylarının hidrologiya xarakteristikalarının hesablanması metodikası (Balakənçay hövzəsi timsalında). Su problemləri: Elm və texnologiyalar. (2), 44–57. https://doi.org/10.30546/wtst
15. Musayeva, M. A. (2017). Azərbaycan ərazisində Böyük Qafqazın şimal-şərq yamacında qar örtüyünün paylanma xüsusiyyətləri. Azərbaycan Coğrafiya Cəmiyyətinin Əsərləri. İnsan və ətraf mühit münasibətləri, Bakı, XX, 325–328.
16. Musayeva, M. A. (2025). Assessment of the impact of climate change on glaciers on the northeastern slopes of the Greater Caucasus. In XIII International Scientific and Practical Conference "Questions. Hypotheses. Answers: Science XXI Century", Toronto, 54–58.
17. Molotch, N. P., & Bales, R. C. (2005). Scaling snow observations from the point to the grid element: Implications for observation network design. Water Resources Research, 41, W11421. https://doi.org/10.1029/2005WR004229
18. Meromy, L., Molotch, N. P., Link, T. E., Fassnacht, S. R., & Rice, R. (2013). Subgrid variability of snow water equivalent at operational snow stations in the western USA. Hydrological Processes, 27, 2383–2400. https://doi.org/10.1002/hyp.9355
19. Otto, F. E. L. (2023). Attribution of extreme events to climate change. Annual Review of Environment and Resources, 48, 813–828. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112621-083538
20. Першин, Д.К., Лубенец, Л.Ф., Черных, Д.В. (2022). Оценка параметров снежного покрова по данным наблюдений на метеостанциях в небольших речных бассейнах на Юге Западной Сибири. 62(1), 81–98. https://doi.org/10.31857/S2076673422010118
21. Rzaeva, S., Guseynov, J., & Tagiyev, A. (2023). Assessment of the impact of climate change on the precipitation regime in the southern slope of the Greater Caucasian province. In The Fifth Eurasian Conference dedicated to the 100th anniversary of Heydar Aliyev, Reliability: Theory & Applications, 5(75), 404–410. https://doi.org/10.24412/1932-2321-2023-575-404-410
22. Sena, Y. N., Chokmani, K., Gloaguen, E., & Bernier, M. (2019). Critical Analysis of the Snow Survey Network According to the Spatial Variability of Snow Water Equivalent (SWE) on Eastern Mainland Canada. Hydrology, 6(2), 55. https://doi.org/10.3390/hydrology6020055
23. Shahgedanova, W. M., Hassell, H. D., Stokes, C. R., & Popovnin, V. (2009). Climate change, glacier retreat, and water availability in the Caucasus region. In Threats to Global Water Security: Environmental Security 140, 131–143. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.02.008
24. Solomina, O., Bushueva, I., Dolgova, E., Jomelli, V., Alexandrin, M., Mikhalenko, V., & Matskovsky, V. (2016). Glacier variations in the Northern Caucasus compared to climatic reconstructions over the past millennium. Global and Planetary Change, 140, 28–58. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.02.008
25. Tielidze, L. G., Nosenko, G. A., Khromova, T. E., & Paul, F. (2022). Strong acceleration of glacier area loss in the Greater Caucasus between 2000 and 2020. The Cryosphere, 16(2), 489–504. https://doi.org/10.5194/tc-16-489-2022
26. Trenberth, K. E. (2011). Changes in precipitation with climate change. Climate Research, 47, 123–138. https://doi.org/10.3354/cr00953
27. World Meteorological Organization. (2017). WMO guidelines on the calculation of climate normals. 1203, 29. Geneva, Switzerland, 29.
28. Yanchenko, N. I., & Antsiferov, E. A. (2024). First results of snow cover temperature measurements at the experimental winter site in Irkutsk. Arctic and Antarctic, (2), 21–32. https://doi.org/10.7256/2453-8922.2024.2.70067
29. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Available at: www.ipcc.ch
30. The State Statistical Committee of the Republic of Azerbaijan. Available at: www.stat.gov.az

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

References

1. Budagov, B. A. (1965). Modern and ancient glaciation in the Greater Caucasus part of Azerbaijan. Baku: ANAS Publishing House. [in Azerbaijani]
2. Hartl, L., Helfricht, H., Waldhuber, M. S., Seiser, B., & Fischer, A. (2022). Classifying disequilibrium of small mountain glaciers from patterns of surface elevation change distributions. Journal of Glaciology, 68(268), 253–268. https://doi.org/10.1017/jog.2021.90
3. Helevera, O., Mostipan, M., & Topolnyi, S. (2023). Winter and spring long-term dynamic of air temperature in Central Ukraine. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology," (59), 83–94. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-07
4. Huseynov, J. S., Tagiyev, A. Sh., & Balammadov, Sh. R. (2024). Characteristics of air temperature on the southern and southeastern slopes of the Greater Caucasus in the modern period. Journal of Geology, Geography and Geoecology, 33(3), 475–484. https://doi.org/10.15421/112444
5. Huseynov, J. S., Huseynova, T. M., & Tagiyev, A. Sh. (2025). Assessment of the impact of climate changes on the quality of life of the population in the Greater Caucasus region of the Republic of Azerbaijan. Journal of Geology, Geography and Geoecology, 34(1), 100–111. https://doi.org/10.15421/112510
6. Ismayılov, R., & Suleymanov, F. (2024). Water resilience under climate change in Azerbaijan. Geojournal of Tourism and Geosites, 53(2), 677–686. https://doi.org/10.30892/gtg.53231-1243
7. Jezdibayeva, B. T., & Mamytova, A. T. (2021). Study of snow cover in the territory of the Ural (Jayik) River Basin. 2021, (4), 29–37. https://doi.org/10.54668/2789-6323-2021-103-4-29-37
8. Largeron, C., Dumont, M., Morin, S., Boone, A., Lafaysse, M., Metref, S., Cosme, E., Jonas, T., Winstral, A., & Margulis, S. A. (2020). Toward snow cover estimation in mountainous areas using modern data assimilation methods: A review. Frontiers in Earth Science, 8, 325. https://doi.org/10.3389/feart.2020.00325
9. Mammadov, R. M. (Ed.). (2015). Geography of the Republic of Azerbaijan: Vol. 1. Physical geography. Baku, Avropa. 530. [in Azerbaijani]
10. Mammadov, R. M., Safarov, S. H., & Safarov, E. S. (2009). Current changes of the atmospheric precipitation regime on the territory of Azerbaijan. Geography and Natural Resources, 30(4), 403–407. https://doi.org/10.1016/j.gnr.2009.11.018
11. Mammadova, L., Negri, S., Tahmazova, M.-K., & Mammadov, V. (2024). A Hydrological and Hydrochemical Study of the Gudiyalchay River: Understanding Groundwater–River Interactions. Water, 16(17), 2480. https://doi.org/10.3390/w16172480
12. Miroslav, K., & Donald, R. N. (2015). Soil regulates the circulation of water on the planet Earth. In Soil, the skin of the planet Earth (pp. 137–158). Dordrecht: Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9789-4_10
13. Miara, A., Macknick, J. E., Vörösmarty, Ch. J., Tidwell, V. C., Newmark, R., & Fekete, B. (2017). Climate and water resource change impacts and adaptation potential for US power supply. Nature Climate Change, 7(11), 793–798. https://doi.org/10.1038/nclimate3417
14. Mansimov, M. R., & Musayeva, M. A. (2021). Methodology for calculating the hydrological characteristics of the unstudied rivers of the southern slope of the Greater Caucasus (on the example of the Balakanchay Basin). Water Problems: Science and Technologies, (2), 44–57. https://doi.org/10.30546/wtst [in Azerbaijani]
15. Musayeva, M. A. (2017). Features of snow cover distribution on the northeastern slope of the Greater Caucasus in Azerbaijan. Works of the Azerbaijan Geographical Society. Human and Environment Relations, XX, 325–328. [in Azerbaijani]
16. Musayeva, M. A. (2025). Assessment of the impact of climate change on glaciers on the northeastern slopes of the Greater Caucasus. In XIII International Scientific and Practical Conference "Questions. Hypotheses. Answers: Science XXI Century", Toronto, 54–58.
17. Molotch, N. P., & Bales, R. C. (2005). Scaling snow observations from the point to the grid element: Implications for observation network design. Water Resources Research, 41, W11421. https://doi.org/10.1029/2005WR004229
18. Meromy, L., Molotch, N. P., Link, T. E., Fassnacht, S. R., & Rice, R. (2013). Subgrid variability of snow water equivalent at operational snow stations in the western USA. Hydrological Processes, 27, 2383–2400. https://doi.org/10.1002/hyp.9355
19. Otto, F. E. L. (2023). Attribution of extreme events to climate change. Annual Review of Environment and Resources, 48, 813–828. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112621-083538
20. Pershin, D. K., Lubenets, L. F., & Chernykh, D. V. (2022). Estimation of snow cover parameters based on observations at meteorological stations in small river basins in the south of Western Siberia. 62(1), 81–98. https://doi.org/10.31857/S2076673422010118
21. Rzaeva, S., Guseynov, J., & Tagiyev, A. (2023). Assessment of the impact of climate change on the precipitation regime in the southern slope of the Greater Caucasian province. In the Fifth Eurasian Conference dedicated to the 100th anniversary of Heydar Aliyev, Reliability: Theory & Applications, 5(75), 404–410. https://doi.org/10.24412/1932-2321-2023-575-404-410
22. Sena, Y. N., Chokmani, K., Gloaguen, E., & Bernier, M. (2019). Critical Analysis of the Snow Survey Network According to the Spatial Variability of Snow Water Equivalent (SWE) on Eastern Mainland Canada. Hydrology, 6(2), 55. https://doi.org/10.3390/hydrology6020055

23. *Shahgedanova, W. M., Hassell, H. D., Stokes, C. R., & Popovnin, V. (2009). Climate change, glacier retreat, and water availability in the Caucasus region. In Threats to Global Water Security: Environmental Security 140, 131–143.* https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.02.008
24. *Solomina, O., Bushueva, I., Dolgova, E., Jomelli, V., Alexandrin, M., Mikhalenko, V., & Matskovsky, V. (2016). Glacier variations in the Northern Caucasus compared to climatic reconstructions over the past millennium. Global and Planetary Change, 140, 28–58.* https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.02.008
25. *Tielidze, L. G., Nosenko, G. A., Khromova, T. E., & Paul, F. (2022). Strong acceleration of glacier area loss in the Greater Caucasus between 2000 and 2020. The Cryosphere, 16(2), 489–504.* https://doi.org/10.5194/tc-16-489-2022
26. *Trenberth, K. E. (2011). Changes in precipitation with climate change. Climate Research, 47, 123–138.* https://doi.org/10.3354/cr00953
27. *World Meteorological Organization. (2017). WMO guidelines on the calculation of climate normals. 1203, 29. Geneva, Switzerland, 29.*
28. *Yanchenko, N. I., & Antsiferov, E. A. (2024). First results of snow cover temperature measurements at the experimental winter site in Irkutsk. Arctic and Antarctic, (2), 21–32.* https://doi.org/10.7256/2453-8922.2024.2.70067
29. *The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Available at:* www.ipcc.ch
30. *The State Statistical Committee of the Republic of Azerbaijan. Available at:* www.stat.gov.az

Аналіз залежності характеристик елементів снігу від орографії на північно-східному схилі Великого Кавказу

Матанат Мусаєва [1]
д. філософії (географія), доцент,
[1] Сумгаїтський державний університет, Сумгаїт, Азербайджан;
Джамал Гусейнов [2]
д. філософії (географія), старший викладач,
[2] Національна авіаційна академія,
АТ «Азербайджанські авіалінії», Баку, Азербайджан;
Махмуд Сулейманов [2]
д. філософії (географія), старший викладач

Спостережуване наразі глобальне потепління проявляє свої наслідки, як і в усіх регіонах, на північно-східному схилі Великого Кавказу. Зокрема, підвищення температури повітря спричинило зміни елементів снігового покриву в цьому районі. Проаналізовано просторово-часовий розподіл елементів снігового покриву, дати формування та танення снігового покриву, а також зміни кількості снігових днів у досліджуваній зоні. Дослідження проводилося з метою визначення зміни елементів снігового покриву залежно від орографії на північно-східному схилі Великого Кавказу. Під час аналізу використовувалися стаціонарні дані про глибину снігового покриву, зібрані з 1964 по 2018 рік на гідрометеорологічних станціях Хачмаз, Куба, Халтан, Алтіагач, Гіріз та Хіналіг, а також дані маршрутів снігових досліджень для басейну Гусарчая з 1986 по 2019 рік. Дослідження проводилося з використанням порівняльних та математико-статистичних методів, а також програмного забезпечення StokStat. Тут було оцінено зв'язок між абсолютною висотою та тривалістю снігового покриву, і було встановлено, що кількість днів зі снігом демонструє більшу стійкість зі збільшенням висоти. Аналіз визначив, що на північно-східному схилі Великого Кавказу в період після 1990 року, хоча висота снігового покриву збільшувалася зі зростанням температури повітря, його щільність зменшувалася. Крім того, терміни формування та танення снігового покриву зазнали мінливості порівняно з попередніми роками (до 1990 року). Цей процес, як і в усіх районах останніми роками, пов'язаний зі зростанням температури повітря та зміною нульової ізотерми в досліджуваній зоні. Аналіз встановив, що у верхніх зонах проходження нульової ізотерми спостерігається через 15-20 днів після середньої дати формування снігового покриву. Навесні було визначено, що сніг починає танути через 25-30 днів після того, як температура перетне нуль градусів. На північно-східному схилі вище 1500 м середня декадна висота снігового покриву коливається в межах 10-25 см, максимальна висота - від 15-30 см, а екстремальна висота - від 30-100 см. Зміна висоти снігової лінії інтенсивно відбувається взимку, що пов'язано з періодичними підвищеннями температури, причому максимальна висота снігу припадає на кінець лютого та початок березня. Результати дослідження можуть бути використані для оцінки водних ресурсів, планування управління водними ресурсами та розробки конкретних заходів з урахуванням впливу зміни клімату на водні ресурси.

Ключові слова: *характерні елементи снігу, орографія, сніговий покрив, північно-східний схил, мінливість кліматичних факторів, висота, фенологічні характеристики снігу, елементи суббалансу, запаси снігу.*

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу
Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 1 травня 2025 р.
Прийнята 18 червня 2025 р.

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-23
UDC 551.521.1
Received 22 April 2025
Accepted 28 May 2025

Analysis of the Radiation Regime of the Atmosphere for the Assessment of Potential Solar Energy Resources of Ukraine

Larysa Nedostrelova [1]
PhD (Geography), Associate Professor, Department of Meteorology and Climatology,
[1] Odesa I. I. Mechnikov National University, Odesa, Ukraine,
e-mail: nedostrelova@ukr.net, https://orcid.org/0000-0001-8532-0481;
Nataliia Chebotarova [1]
BSc student Department of Meteorology and Climatology,
e-mail: chebotarevanatasha17@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-0064-861X

ABSTRACT

Problem Statement. Solar energy is steadily gaining a strong foothold in global energy systems. Solar energy is accessible in every corner of our planet, differing in radiation density by no more than a factor of two. Moreover, solar energy is an environmentally clean energy source, enabling its use on an ever-increasing scale without adverse effects on the environment. Solar energy is also an almost inexhaustible source of energy, available even millions of years from now. Thanks to the development of solar installation designs, which are economically viable in certain physical-geographical areas, the prospects for utilizing radiant energy from the Sun have become more tangible. However, this requires researchers to conduct detailed studies of the energy resources of specific regions of the globe to assess their energy potential thoroughly.

The purpose of this article is to identify the characteristics of the atmospheric radiation regime to evaluate Ukraine's solar energy resources.

Methodology. The utilization of solar energy primarily depends on the geographical location of the area, and the level of solar radiation determines the efficiency of solar installations. Therefore, analyzing the prospects for using solar radiation in various regions of Ukraine based on their geographical location, cloudiness, and season is essential. Solar energy inflow across Ukraine should be studied not individually by regions but grouped by the geographical position of the regions in degrees of northern latitude. To assess the potential solar energy resources of a given area, justify the technical-design parameters of various solar systems, and evaluate the economic feasibility of their operation across different seasons and times of day at specific locations, the following indicators are needed: potential sums of direct, diffuse, and total solar radiation, sunshine duration (number of hours), average cloud cover indicators, number of clear and cloudy days. The research includes an analysis of total solar radiation sums under various sky conditions and sunshine duration for Ukrainian regions over different periods. Meteorological stations across different regions of the country were selected to achieve the study's objectives.

Results. The analysis of total radiation flows over the territory of Ukraine for different periods and under various sky conditions shows that the maximum sums are typical for Odesa, while the minimum values are observed in Kovel. The annual distributions have a clearly defined pattern, with peaks in June and July. The sums of total radiation differ under various sky conditions across regions: in summer, these changes range between 10–30 %, while in winter, the values may vary 1.5 to 2.5 times, particularly during the 1991-2020 period. Annual sums of total radiation are generally lower during the 1961-1990 period. The analysis of sunshine duration demonstrates that the highest figures are characteristic of Odesa. The annual curves have a similar structure across different periods at all stations, with peaks in June-July and lows in December.

Novelty and Practical Significance. The study analyzed two indicators of the atmospheric radiation regime – total solar radiation inflow and sunshine duration across different climatic periods. The findings of the research highlight that Ukraine's energy potential is promising for supporting the fuel-energy sector and the further development of the country's solar energy industry.

Keywords*: total solar radiation, sunshine duration, solar energy resources, alternative energy, annual indicators, long-term distribution, climate normals, solar radiation under clear sky conditions, solar radiation under average cloud cover conditions.*

In cites: Nedostrelova Larysa, Chebotarova Nataliia (2025). Analysis of the Radiation Regime of the Atmosphere for the Assessment of Potential Solar Energy Resources of Ukraine. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 300-311. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-23

Problem Statement. The major challenges that humanity faced entering the 21st century are energy and ecology. The rapid industrial development of a group of countries in the Northern Hemisphere was fueled by the intensive growth in the production of electricity and thermal energy. Over the past 150 years, since the mid-19th century, the Earth's population has grown fivefold, while energy production has increased twenty-one times. According to expert estimates by the International Energy Agency, the production of primary energy globally will grow annually by an average of 1.7% until 2030 [1, 2]. At the same time, it is assumed that more than 90% of this growth in energy production will rely on fossil fuels. The ever-increasing volumes of its use lead to higher CO_2 emissions and other greenhouse gases into the atmosphere, negatively affecting the planet's climate. Moreover, reserves of fossil fuels, particularly easily accessible ones such as oil and gas, are fairly limited. Various assessments suggest that significant depletion could occur by the mid-21st century. Meanwhile, our planet has practically inexhaustible (in the context of human history) renewable energy sources, primarily including solar energy,

© Nedostrelova Larysa, Chebotarova Nataliia, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

wind, rivers, and biomass [1].

Solar energy is steadily securing a strong position in the global energy sector. Its appeal is determined by several factors. Solar energy is available at every point on our planet, differing in radiation flux density by no more than two times. This makes it attractive to all countries as it aligns with their interests in achieving energy independence. Solar energy is an environmentally clean source that allows for expanding use without causing negative effects on the environment. Moreover, it is a virtually inexhaustible energy source that will remain accessible even in millions of years [1].

Currently, the development of solar power system designs, whose operation is economically feasible in certain physico-geographical regions, has made the prospects of utilizing solar radiant energy more tangible. However, this, in turn, requires researchers to conduct a detailed study of the energy resources of specific regions of the globe to determine their energy potential.

Analysis of Recent Studies and Publications. The primary energy source that sustains life on Earth is the Sun, whose energy reaching our planet annually exceeds the energy of all extracted reserves of fossil fuels by 10 to 20 times. This explains the global community's attention to utilizing solar energy, particularly in industrially developed countries [1].

Forecasts for the development of renewable energy sources over the longer term (by 2050), based on current growth rates of energy equipment capacity, indicate that the share of such sources in electricity production in EU countries could approach up to 50 %. This would make a significant contribution to improving the planet's ecology, reduce the anthropogenic impact on the climate, and create conditions for the continued sustainable development of our civilization [3].

Modern global energy systems, including them in Ukraine, are predominantly based on non-renewable energy sources. Due to their limited reserves, these sources are finite and cannot ensure sustainable energy development over the long term. Additionally, their use is one of the primary factors contributing to environmental degradation. Significant attention is being given to the development of alternative, unconventional renewable energy sources. In Ukraine, the share of alternative energy sources in the total energy consumption does not exceed 0.7%. This is despite the adoption of the "Energy Strategy of Ukraine until 2030" by the Cabinet of Ministers on March 15, 2006, which aims to increase the share of alternative energy sources up to 19% of the country's total fuel and energy balance by 2030 [2]. Under current conditions, Ukraine, as an energy-deficient country, faces the urgent task of developing alternative energy. The primary advantages of alternative energy over traditional non-renewable sources include practically inexhaustible resources and reduced environmental impact, such as lower emissions of pollutants, greenhouse gases, radioactive and thermal pollution, etc.

Solar energy is a type of renewable energy in which electricity is generated using solar radiation [4]. The use of solar energy not only helps preserve the Earth's climate but also reduces countries' dependence on imported hydrocarbons. The amount of solar energy is reaching the Earth's surface in one week exceeds the energy of the world's reserves of oil, gas, coal, and uranium combined. Humanity utilizes only one ten-thousandth of this type of energy. Scientists are confident that if humans utilized even 1 % of solar energy, the energy crisis would be in the past [1]. In Ukraine, several dozen experimental projects have been implemented in various sectors of the national economy. They include systems for hot water supply in residential and public buildings, as well as in healthcare facilities; solar collector systems integrated with fuel and electric boiler plants serving industrial, agricultural, and municipal enterprises; and small autonomous installations for individual households and consumer service enterprises. A significant potential for using solar energy in Ukraine lies in employing it for cooling and air conditioning, as well as in agricultural applications, such as drying various types of agricultural products and desalinating water in southern regions [5-11].

Alternative energy is designed to help solve, first of all, two important problems – environmental safety and energy efficiency. The issue of energy efficiency of alternative fuels in Ukraine is the most relevant than in the world. The efficiency of solar installations is primarily influenced by the level of solar energy, which in turn depends on the geographical location of the territory [1].

Identification of Previously Unresolved Aspects of the General Problem. In recent years, a significant number of scientific and practical works have been published, addressing the efficient use of solar energy [1, 5, 12, 13]. The prospects for replacing traditional fuel and energy resources with alternative energy sources are presented in academic works [14, 15]. But most of these studies focus on the efficiency and rational use of renewable energy sources, while the issue of their potential remains underexplored. Analytical and experimental studies of the distribution of solar energy throughout the day and year are presented in the monograph [16], but it does not include data on the amount of solar energy reaching Ukraine's territory. Climatic data used for the calculation and design of solar power systems are provided in the State Building Standards of Ukraine [17]. However, these standards do

not account for the seasonal solar energy amounts depending on geographic latitude.

The purpose of the article is to identify the characteristics of the radiation regime of the atmosphere to assess the solar energy resources of Ukraine.

Presentation of the Main Research Material. Assessing the energy potential of solar energy is a crucial factor in selecting the location for solar installations. The efficiency of solar systems depends on the level of solar energy, which, in turn, is influenced by geographical latitude. The operating mode of solar energy installations is determined by a set of heliophysical parameters needed to utilize their energy potential with specific characteristics. These characteristics account for the chronological steady course of solar radiation and its random variability over time, caused by various atmospheric phenomena. To evaluate the feasibility of solar energy installations, specialized indicators of climatic resources are used [1, 13, 18, 19]. The utilization of solar energy primarily depends on the geographical location of the area, while the level of solar radiation determines the efficiency of solar installations. Therefore, analyzing the prospects for solar radiation usage in different regions of Ukraine, based on their geographical location, cloud cover, and seasonal variations, is essential. According to the State Building Standards, it is advisable to analyze the inflow of solar energy into the territory of Ukraine not separately by region, but by combining them according to the geographical location of the regions in degrees of northern latitude. To determine the potential solar energy resources of a particular area, justify technical design parameters of various solar systems, and assess their economic efficiency during different seasons and times of the day at a specific location, a set of indicators is required. These include values of possible sums of direct, diffuse, and total solar radiation; the number of sunshine hours (duration of sunshine); average cloud cover indices; and the number of clear and cloudy days.

The article presents an analysis of total solar radiation values under different sky conditions and sunshine durations for various regions of Ukraine across different time periods. To achieve the research objective, meteorological stations in specific regions of the country were selected: Kovel in northwestern Ukraine, Odesa in southwestern Ukraine, Poltava in central Ukraine, and Pokoshychi in northern Ukraine. The research periods cover 1951-1963 [20], 1961-1990 [21], and 1991-2020 [22].

In Fig. 1, the sums of total solar radiation under clear sky conditions at the Pokoshychi station are presented. The distributions exhibit a distinct annual pattern, with minimum values in December and maximum values in June across all periods. The highest sums under clear sky conditions at the station were observed during the period of 1991-2020. In November and the winter season, the values are lower compared to other periods, while from March to August, the highest values are recorded during this period. In September, the values for 1961-1990 and 1991-2020 are identical, at 494 MJ/m², whereas for 1951-1963, the sums are greater than in the other periods, reaching 499 MJ/m². In October, November, and December, the total solar radiation sums are also the highest during the 1991-2020 period.

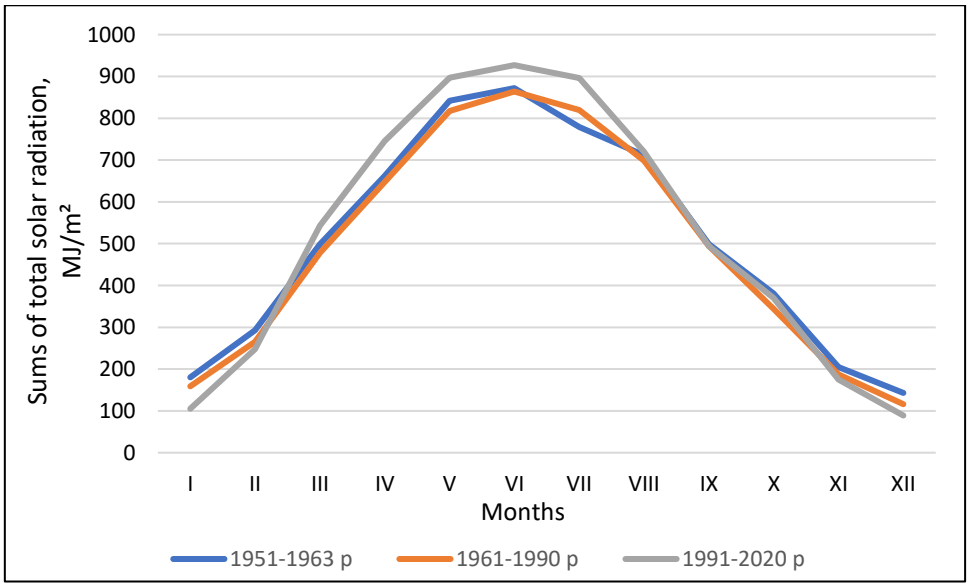


Fig. 1. Sums of total solar radiation (MJ/m²) under clear sky conditions at the Pokoshychi Station

The highest sums of total solar radiation under clear sky conditions at the Kovel station across different periods (Fig. 2) were observed during the 1951-1963 period, with a maximum value of 918 MJ/m². Slight differences were noted in February between the 1951-1963 and 1961-1990 periods,

with values of 268 MJ/m² and 262 MJ/m², respectively. The 1991-2020 period stands out with the lowest total radiation values throughout the year, except in August, when a maximum of 912 MJ/m² was recorded, surpassing all other periods. It is noteworthy that in the summer season, the curve exhibits a slight wave pattern, with a minimum in July and peaks in June and August, which is atypical for the distribution of total radiation flows.

The annual distribution of total solar radiation sums under clear sky conditions at the Poltava station (Fig. 3) indicates that the highest values during May, June, July, and August were observed in the period from 1991 to 2020. In the autumn and winter seasons, the 1951-1963 period demonstrated higher values, albeit with minor differences compared to other periods. The maximum sum for the Poltava station is 948 MJ/m², recorded during the 1991-2020 period. It is noteworthy that the lowest total radiation flows occurred during the 1961-1990 period

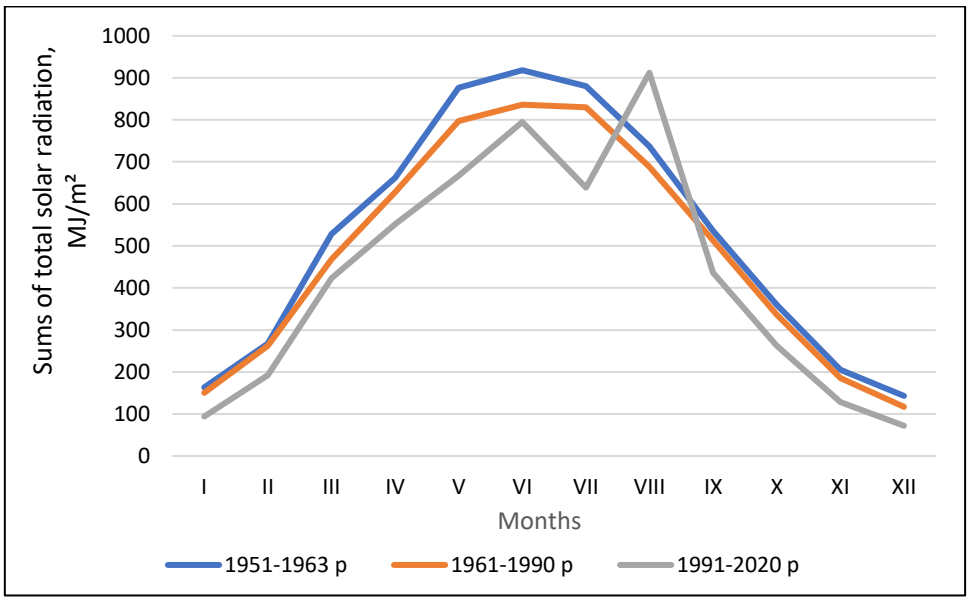


Fig. 2. Sums of total solar radiation (MJ/m²) under clear sky conditions at the Kovel Station

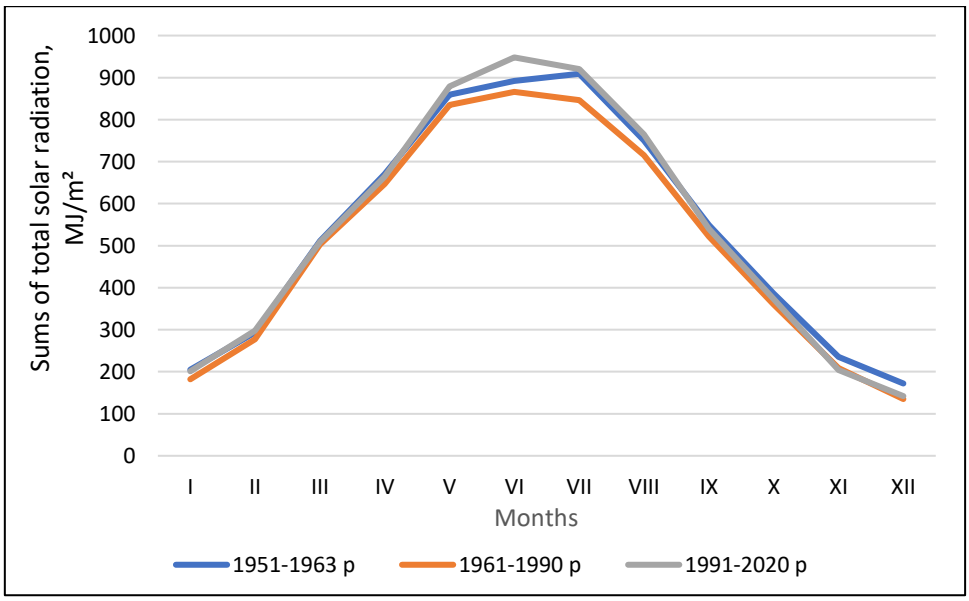


Fig. 3. Sums of total solar radiation (MJ/m²) under clear sky conditions at the Poltava station

throughout the annual distribution.

The results for the Odesa station (Fig. 4) indicate that the highest sums of total solar radiation under clear sky conditions were recorded during the 1951-1963 period. The maximum value for this period is 913 MJ/m², observed in June. The lowest radiation flows were noted during the 1961-1990 period across the annual distribution. Overall, a small difference in quantitative indicators throughout the year can be observed between the 1951-1963 and 1991-2020 periods.

As is known, solar radiation flows depend on sky conditions. Therefore, the next task of the study is to analyze the annual distribution of total solar

radiation sums under average cloud cover conditions. The results of the calculations are presented in Figures 5-8.

At the Pokoshychi station (Fig. 5), the highest sums of total solar radiation under average cloud cover conditions were observed during the 1991-2020 period, except for the winter months and November. In these months, the values were higher during the 1951-1963 period. From the figure, it is evident that the values for the 1951-1963 and 1961-1990 periods are nearly identical, except in July. Additionally, it is noteworthy that the peak in July was recorded only during the 1951-1963 period, while in other periods, it occurred in June. The highest value for the Pokoshychi station is 683 MJ/m², recorded in June 1991-2020.

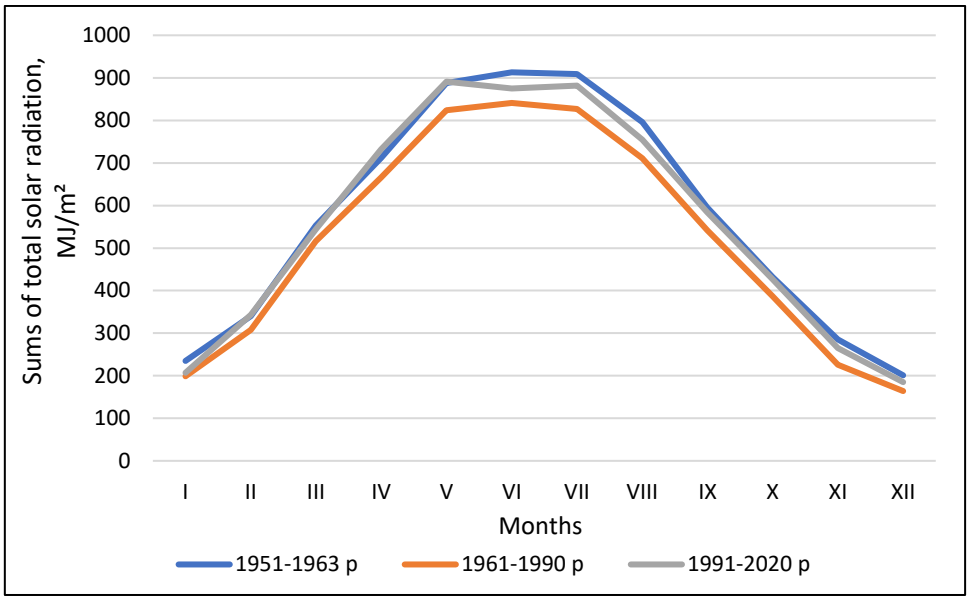


Fig. 4. Sums of total solar radiation (MJ/m²) under clear sky conditions at the Odesa station

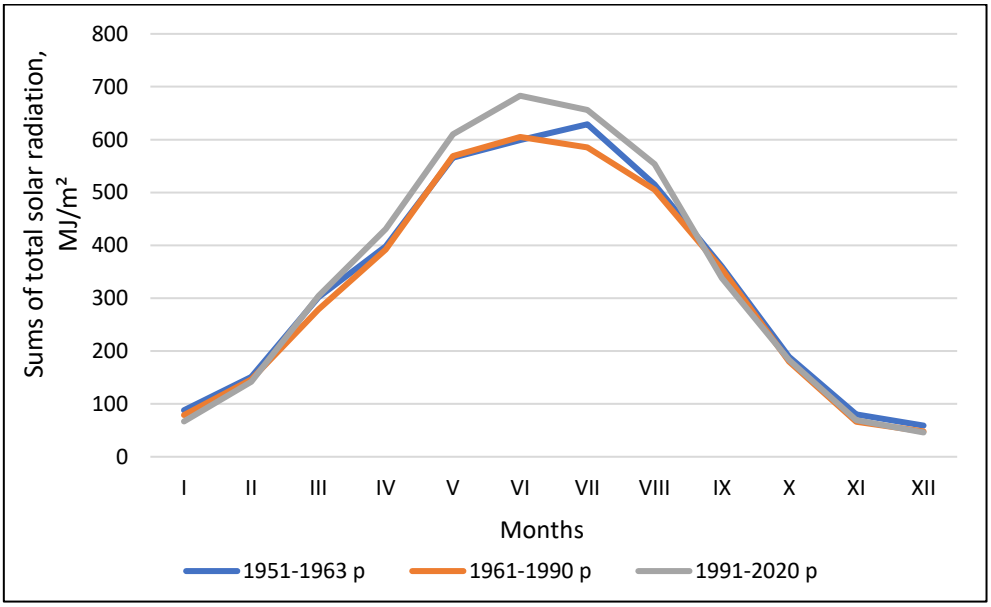


Fig. 5. Sums of total solar radiation (MJ/m²) under average cloud cover conditions at the Pokoshychi Station

At the Kovel station (Fig. 6), the highest sums of total solar radiation under average cloud cover conditions were observed during the 1951-1963 period. The annual distribution shows that values across the three periods in January, February, November, and December are nearly identical. The highest recorded value for the station is 615 MJ/m² in June during the 1991-2020 period, with a slight difference of 612 MJ/m² in the 1951-1963 period. In August 1991-2020, a unique peak was recorded, which is absent in the other periods.

At the Poltava station (Fig. 7), the highest sums under average cloud cover conditions were found during the 1991-2020 period. The distribution indicates minimal differences in values across the three periods for January, February, March, November,

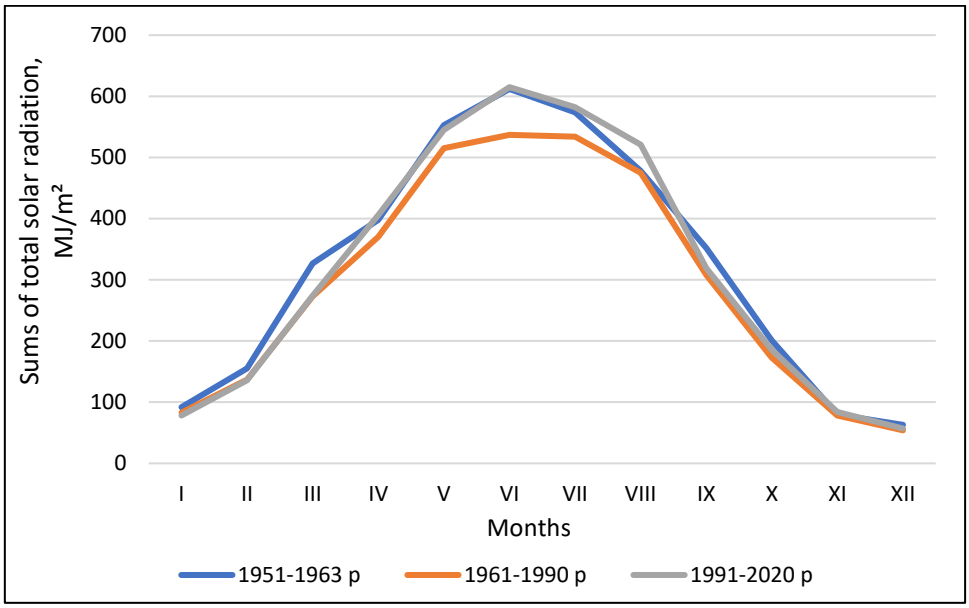


Fig. 6. Sums of total solar radiation (MJ/m²) under average cloud cover conditions at the Kovel Station

and December. The maximum value for the station is 699 MJ/m² in June. For the 1951-1963 and 1961-1990 periods, the values are approximately equal, except during the summer season, where the peak shifted by one month from June in 1961-1990 to July in 1951-1963.

At the Odesa station, there are no differences in the annual distribution of total solar radiation sums between the periods 1951-1963 and 1991-2020 (Fig. 8). The highest sums were observed in the 1951-1963 period, with the maximum value reaching 758 MJ/m² in July. The same month also recorded a peak of 731 MJ/m² during the 1991-2020 period. From March to September, the sums of total radiation in the 1961-1990 period are the lowest compared to the other periods. Quantitative indicators for January, February, September, November, and December are nearly identical across all periods.

It is appropriate to analyze the long-term sums of total solar radiation (Fig. 9-10). The highest quantitative indicators are recorded at the Odesa station under various sky conditions. In other cases, the histograms do not differ significantly, except for the data at the Kovel station. Here, the radiation sums under clear sky conditions are highest during the 1951-1963 period and gradually decrease over subsequent periods. In Poltava, by contrast, the annual sums increase from the first to the third period. At the Pokoshychi and Odesa stations, a certain oscillatory pattern is observed, with a minimum in the second period. Under average cloud cover conditions, a similar distribution of total radiation sums is observed across stations, except for Poltava, where the annual sums increase consistently from the first

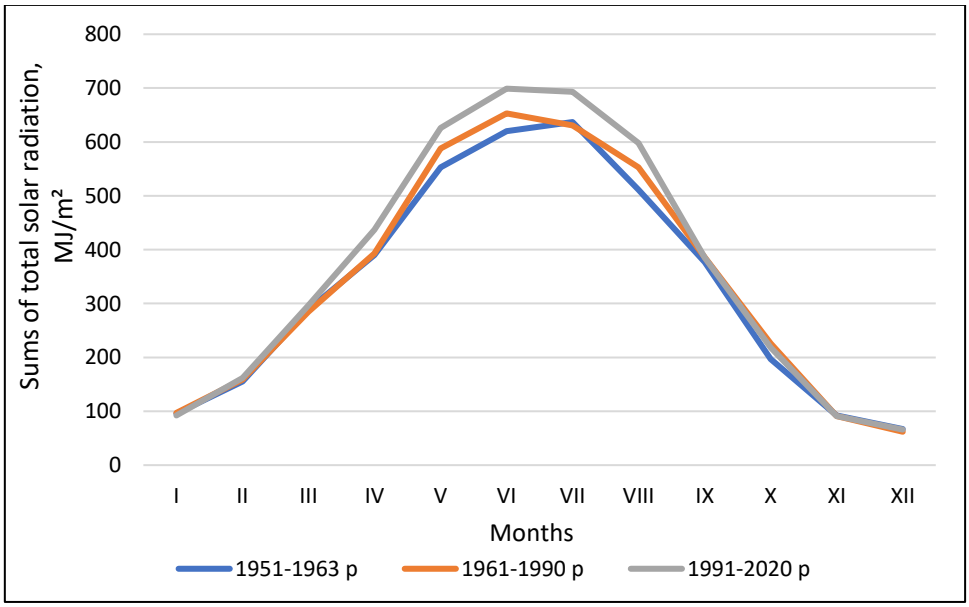


Fig. 7. Sums of total solar radiation (MJ/m²) under average cloud cover conditions at the Poltava Station

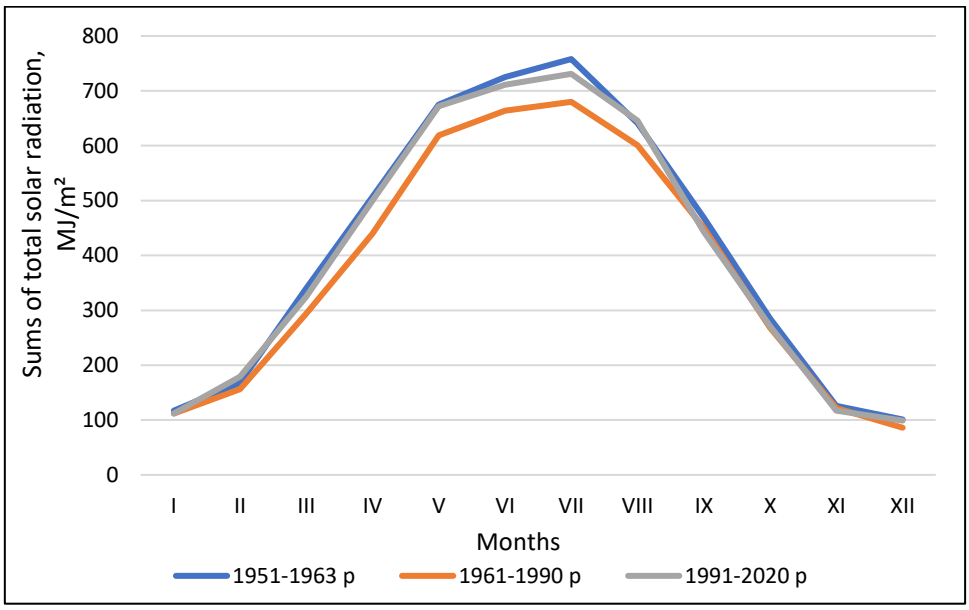


Fig. 8. Sums of total solar radiation (MJ/m²) under average cloud cover conditions at the Odesa Station

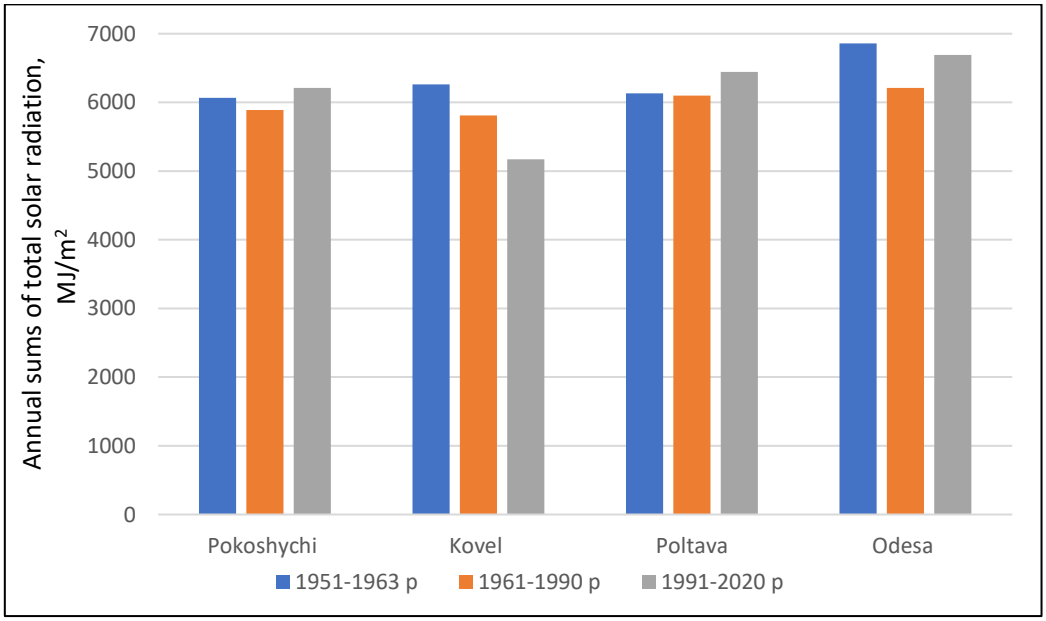


Fig. 9. Long-term sums of total solar radiation under clear sky conditions, MJ/m²

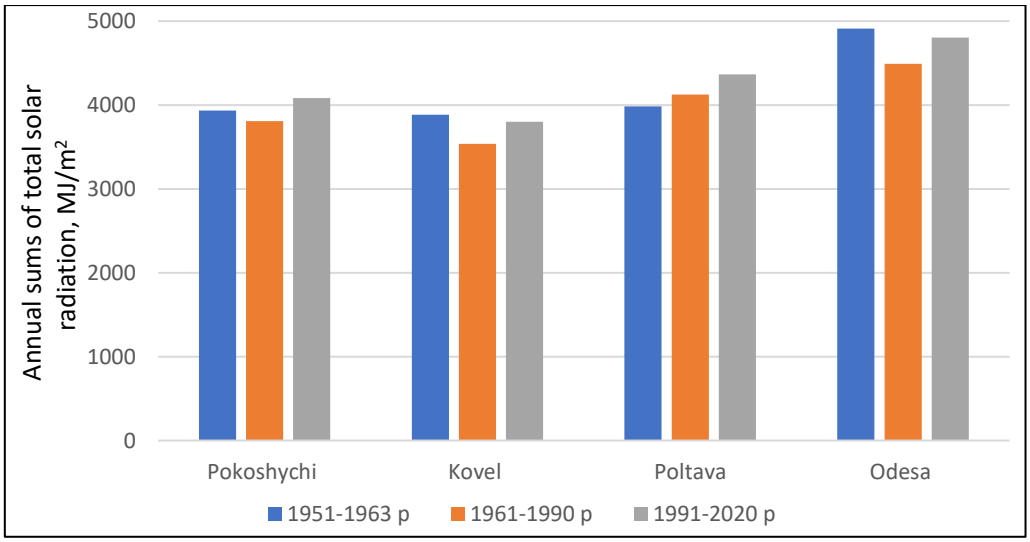


Fig. 10. Long-term sums of total solar radiation under average cloud cover conditions, MJ/m²

to the third period.

As mentioned earlier, one of the key characteristics of the radiation regime is the duration of sunshine. The heterogeneity of the underlying surface creates a mosaic pattern in the distribution of sunshine duration in mountainous regions. Due to anthropogenic activities, such as urbanization and large industrial complexes, atmospheric pollution reduces the number of sunshine hours. Throughout Ukraine, annual sunshine duration ranges from less than 1600 hours in the northwest to over 2300 hours in the southern regions of the Crimean Peninsula [23]. December marks the minimum values for the entire country, as the shortest daylight hours and a high probability of cloudy skies are characteristic of this month. Starting in March, the increase in daylight duration (approximately from 8 hours in December to 12 hours in March) and the noticeable decrease in cloudiness lead to a significant rise in sunshine duration from the Polissia to the steppe zones. The monthly maximum duration is reached in July, determined by the longest daylight hours and the highest number of clear and partly clear days compared to other months [1].

Continuous sunshine duration, which minimizes energy consumption for heating solar installations, according to B. N. Vanberg, should exceed 6 hours per day. Across most of Ukraine, this value is surpassed during the radiation-warm period (April-September), ranging from 6.5 hours in April and September in the northwest and northeast, increasing southward: from 6.5 hours in April to 7-8 hours in September. The highest values are observed in summer, especially in June, when daily sunshine duration increases to 9-10 hours, starting from the northern regions. The exception is the mountainous areas of the Ukrainian Carpathians, where this value slightly increases in summer months (up to 7 hours). However, during certain years, the minimum values in these regions can be almost half of the required level [1, 24].

In Figure 11, the duration of sunshine at the Pokoshychi station is presented for different periods. The longest duration is observed in June during the 1991-2020 period, reaching 298 hours. During the 1951-1963 period, the distribution shows two peaks in May and July, distinguishing this period from others. In December, the values for both the 1991-2020 and 1951-1963 periods are identical at 23 hours, while in February, the duration is 66 and 65 hours, respectively. For the 1961-1990 period, the February duration is 27 hours. During the summer season, the quantitative values for the 1961-1990 period are the lowest.

At the Kovel station (Fig. 12), the highest sunshine duration is recorded in July during the 1991-2020 period, reaching 272 hours. Overall, the values during this period are greater compared to other periods throughout the spring and summer seasons. In October, the values across all periods are similar: 124 hours for 1951-1963, 120 hours for 1961-1990, and 119 hours for 1991-2020. During the winter season, the maximum duration is observed in the 1961-1990 period. At the Poltava station (Fig. 13), the annual sunshine durations across all periods are generally similar. The largest difference is observed in April. Winter and summer season peaks are recorded during the 1961-1990 period. Throughout spring, the highest values are found during the 1991-2020 period. The maximum sunshine duration is observed in June during the 1961-1990 period, reaching 299 hours. However, the difference compared to other periods is not significant: 293 hours for 1951-1963 and 292 hours for 1991-2020.

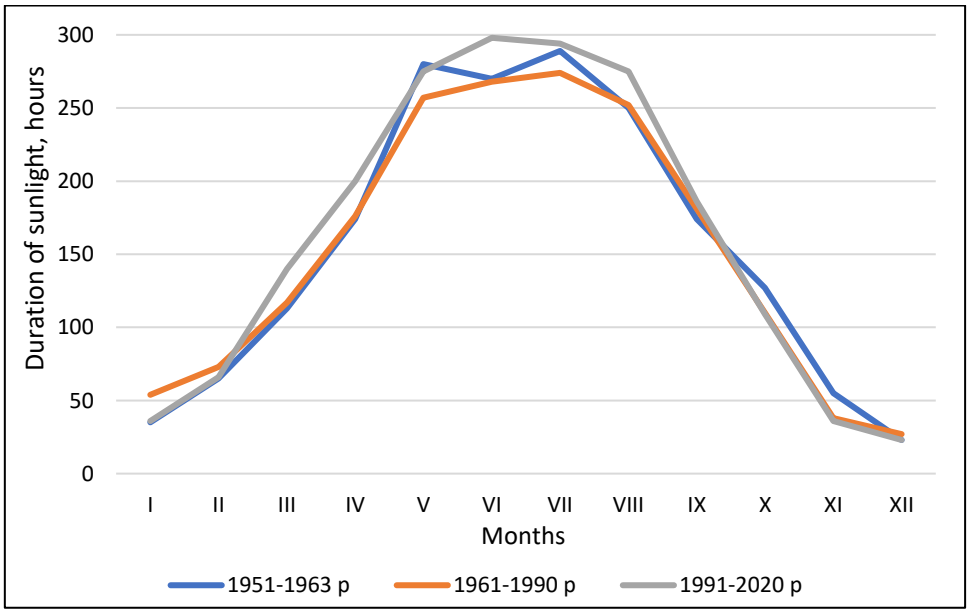


Fig. 11. Duration of sunlight at Pokoshichi Station, hours

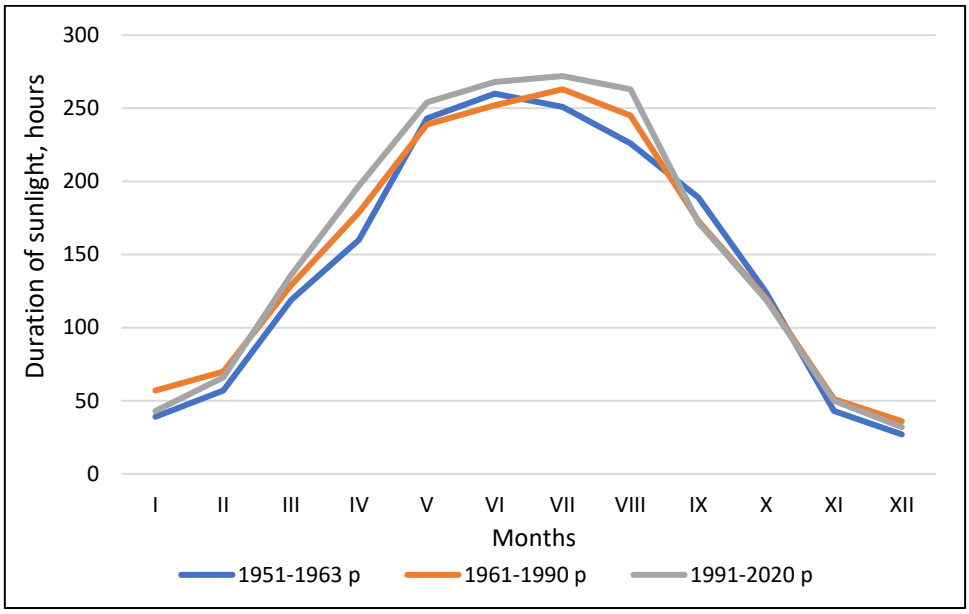


Fig. 12. Duration of sunlight at Kovel Station, hours

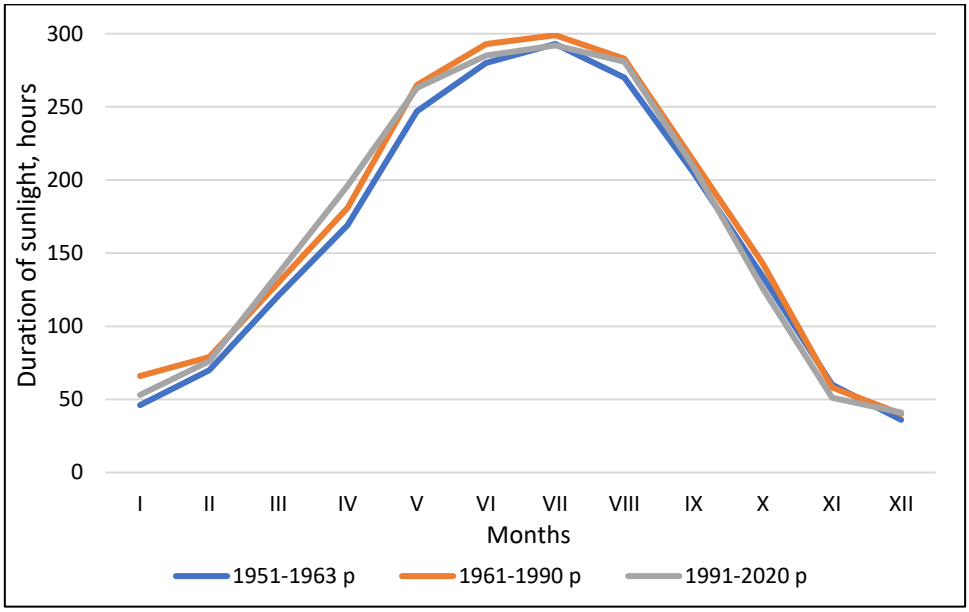


Fig. 13. Duration of sunlight at Poltava Station, hours

It is evident that in Odesa (Fig. 14), the sunshine duration is the highest compared to other stations. The maximum value is recorded in June during the 1951-1963 period, reaching 349 hours, while for the 1991-2020 period, the duration is 348 hours.

In autumn, the quantitative indicators for all periods are similar. During spring and summer, the minimums were recorded for 1961-1990, the maximums for the period 1991-2020.

Conclusions. Analysis of the total radiation fluxes on the territory of Ukraine for different periods under different sky conditions shows that the maximum amounts are characteristic of Odessa, the minimum - for Kovel. Annual distributions have a clearly expressed character with a maximum in June and July. The total radiation amounts differ under different sky conditions for different regions: in summer, these changes fluctuate within 10-30%, in winter these indicators can change by 1.5-2.5 times, especially in the period 1991-2020. The annual total radiation amounts are generally lower in the period 1961-1990. Analysis of the duration of sunshine shows that the highest indicators are characteristic of Odessa. The annual flow curves have a similar structure for different periods for all stations with peaks in June-July and lows in December.

In this work were analyzed two key indicators of the atmospheric radiation regime – total solar radiation sums and sunshine duration. The findings highlight that Ukraine's energy potential is promising for supporting the fuel-energy sector and advancing the development of the country's solar ener-

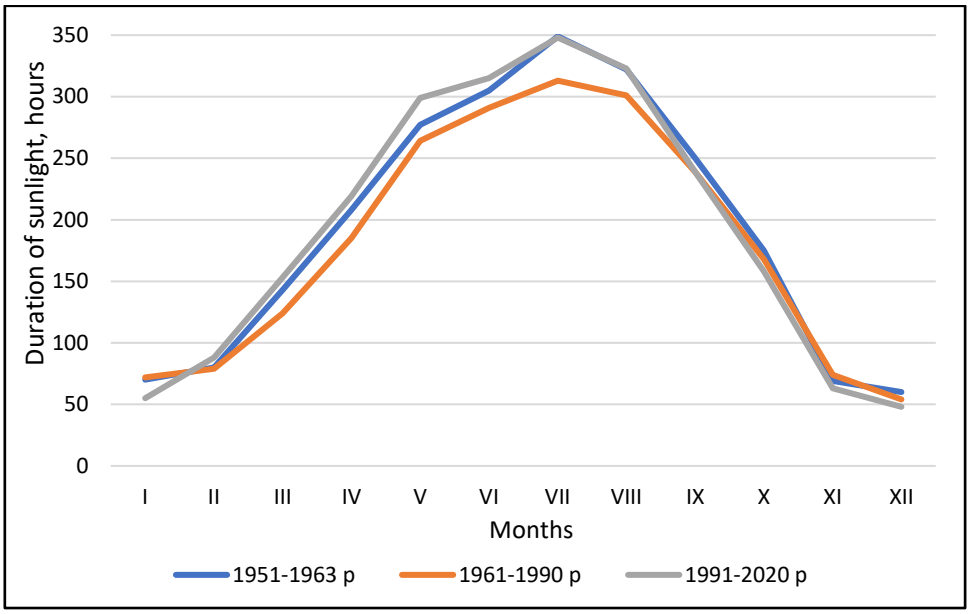


Fig. 14. Duration of sunlight at Odesa Station, hours

gy industry. For more substantiated conclusions, an analysis of average cloud cover indicators and the number of clear and cloudy days is necessary. This will serve as the next step in researching the atmospheric radiation regime to evaluate Ukraine's solar energy resources more comprehensively.

Bibliography

1. *Степаненко, С. М., Польовий, А. М. (2018). Кліматичні ризики функціонування галузей економіки України в умовах змін клімату: монографія. Одеса: ОДЕКУ, 548.*
2. *Енергетична стратегія України на період до 2030 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 15.03.2006 р. № 145-р. Режим доступу : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/145-2006-%D1%80#Text*
3. *Рибченко, Л. С., Савчук С. В. (2008). Зміна температурного і радіаційного режиму в містах України. Український географічний журнал, 2, 14–19.*
4. *Сонячна енергія. Чому це вигідно для України. Режим доступу : http://teplovam.com/index.php/opalennya/4-soniachni-systemy?showall=&start*
5. *Використання сонячної енергії для теплопостачання – перший крок до енергетичної незалежності. Режим доступу: https://science.lpnu.ua/sctp/all-volumes-and-issues/volume-823-2015/energetichniy-potencial-sonyachnoyi-radiaciyi-na*
6. *Енергетичний потенціал сонячної радіації на території України. Електронний науковий архів Науково-технічної бібліотеки Національного університету "Львівська політехніка". Режим доступу : https://science.lpnu.ua/sctp/all-volumes-and-issues/volume-823-2015/energetichniy-potencial-sonyachnoyi-radiaciyi-na*
7. *Кулик, Н. (2015). Жити під сонцем : відновлювальна енергетика в Україні. Освіта України, 23, 12–13.*
8. *Литвин, О. О., Куріс, Ю. В. (2012). Збільшення ефективності подальшого використання сонячної енергетики: "Досягнення і перспективи". Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит, 3, 39–40.*
9. *Шаповал, С. П., Венгрин, І. І. (2014). Перспективи використання сонячної енергії на території України. Національний університет «Львівська політехніка». «Молодий вчений», 7 (10), 21–24.*
10. *Щодо перспектив використання альтернативних джерел енергії на Сході України. Аналітична записка. Режим доступу: http://www.niss.gov.ua/articles/1174.*
11. *Електронний ресурс: https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?uid=3030.*
12. *Аналітична записка. Національний інститут стратегічних досліджень при Президентові України. Режим доступу : www.niss.gov.ua/articles/1174.*
13. *Степаненко, С. М., Польовий, А. М. (2011). Оцінка впливу кліматичних змін на галузі економіки : монографія. Одеса: Екологія, 694.*
14. *Гелетуха, Г., Кудря, С. (2005). Україна: нетрадиційні та відновлювані джерела енергії. Зелена енергетика, 2, 8–10.*
15. *Петрук, В. Г., Коцюбинська, С. С., Мацюк, Д. В. (2007). Енергетичний потенціал альтернативної енергетики в Україні. Вісник Вінницького політехнічного інституту, 4, 90–93.*
16. *Мисак, Й. С., Возняк, О. Т., Дацько, О. С., Шаповал, С. П. (2014). Сонячна енергетика: теорія та практика: монографія. Львів, Україна: Видавництво Львівської політехніки, 340.*
17. *Будівельна кліматологія: ДСТУ-НБВ.1.1–27:2010. (2011). Київ: Мінрегіонбуд, 123.*

18. Рибченко, Л. С., Савчук С. В. (2015). Потенціал геліоенергетичних кліматичних ресурсів сонячної радіації в Україні. Український географічний журнал, 4, 16–23.
19. Рибченко, Л. С., Савчук С. В. (2017). Моніторинг геліоенергетичних ресурсів України. Український гідрометеорологічний журнал, 19, 65–71.
20. Сонячна радіація, радіаційний баланс і сонячне сяйво : кліматичний довідник, випуск 10, частина І. (2000). Київ, Україна.
21. Кліматичний кадастр України (стандартні кліматичні норми за період 1961-1990 рр.). (2006). Державна гідрометеорологічна служба та ін. УНДГМІ-ЦГО, Київ, Україна.
22. Глобальні стандартні кліматичні норми (1991-2020 рр.). (2021). Український гідрометеорологічний центр ДСНС України. Київ, Україна.
23. Ліпінський, В. М., Дячук, В. А., Бабіченко, В. М. (2003). Клімат України. Київ: вид-во Раєвського, 343.
24. Чеботарьова, Н., Недострелова, Л. (2023). Тривалість сонячного сяйва як один з показників геліоенергетичних ресурсів країни. Polish international science journal, 8(64), 53-58.

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

References

1. Stepanenko, S. M. & Poliovyi, A. M. (eds) (2018). Climatic risks of the functioning of the Ukrainian economy in the minds of climate change. Odesa, Ukraine: ODEKU, 548. [in Ukrainian]
2. Energy Strategy of Ukraine for the period until 2030. Available at: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/145-2006-%D1%80#Text [in Ukrainian]
3. Rybchenko, L. S., Savchuk, S. V. (2008). Change in temperature and radiation regime in Ukrainian cities. Ukrainian Geographical Journal, 2, 14–19. [in Ukrainian]
4. Solar energy. Why it is beneficial for Ukraine. Available at : http://teplovam.com/index.php/opalennya/4-soniachni-systemy?showall=&start [in Ukrainian]
5. Using solar energy for heating is the first step towards energy independence. Available at: https://science.lpnu.ua/sctp/all-volumes-and-issues/volume-823-2015/energetichniy-potencial-sonyachnoyi-radiaciyi-na [in Ukrainian]
6. Energy potential of solar radiation in Ukraine. Available at: https://science.lpnu.ua/sctp/all-volumes-and-issues/volume-823-2015/energetichniy-potencial-sonyachnoyi-radiaciyi-na [in Ukrainian]
7. Kulyk, N. (2015). Living under the sun: renewable energy in Ukraine. Education of Ukraine, 23, 12–13. [in Ukrainian]
8. Lytvyn, O. O., Kuris Yu. V. (2012). Increasing the efficiency of further use of solar energy: "Achievements and prospects". Energy Saving. Energy. Energy Audit, 3, 39–40. [in Ukrainian]
9. Shapoval, S. P., Venhryn, I. I. (2014). Prospects for the use of solar energy in Ukraine. "Young Scientist", 7 (10), 21–24. [in Ukrainian]
10. Regarding the prospects for the use of alternative energy sources in Eastern Ukraine. Analytical note. Available at : http://www.niss.gov.ua/articles/1174. [in Ukrainian]
11. Electronic resource: https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?uid=3030. [in Ukrainian]
12. Analytical note. Available at : http://www.niss.gov.ua/articles/1174. [in Ukrainian]
13. Stepanenko, S.M., Polovij, A.M. (eds) (2011). Assessment of the impact of climate change on the economy of Ukraine. Odessa, Ukraine: Ekologiya, 694. [in Ukrainian]
14. Heletukha, H., Kudria, S. (2005). Ukraine: non-traditional and renewable energy sources. Green Energy, 2, 8–10. [in Ukrainian]
15. Petruk, V. H., Kotsiubynska, S. S., Matsiuk, D. V. (2007). Energy potential of alternative energy in Ukraine. Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute, 4, 90–93. [in Ukrainian]
16. Mysak, Y. S., Vozniak, O. T., Datsko, O. S., Shapoval, S. P. (2014). Solar energy: theory and practice. Lviv, Ukraine: Polytechnic Publishing House, 340. [in Ukrainian]
17. Building climatology DSTU-NBV.1.1–27:2010. (2011). Kyiv, Ukraine: Minregionstroy, 123. [in Ukrainian]
18. Rybchenko, L. S., Savchuk, S. V. (2015). Potential of solar energy climatic resources of solar radiation in Ukraine. Ukrainian Geographical Journal, 4, 16–23. [in Ukrainian]
19. Rybchenko, L. S., Savchuk, S. V. (2017). Monitoring of solar energy resources of Ukraine. Ukrainian Hydrometeorological Journal, 19, 65–71. [in Ukrainian]
20. Solar radiation, radiation balance and solar radiance: climate handbook, issue 10, part I. (2000). Kyiv, Ukraine. [in Ukrainian]
21. Climatic Cadastre of Ukraine (standard climatic norms for the period 1961-1990). (2006). State Hydrometeorological Service, etc. UNDGMI-CGO. Kyiv, Ukraine. [in Ukrainian]
22. Global standard climate norms (1991-2020). (2021). Ukrainian Hydrometeorological Center of the State Emergency Service of Ukraine. Kyiv, Ukraine. [in Ukrainian]

23. *Lipinskyi, V. M., Dyachuk, V. O., Babichenko, V. M. (2003). Climate of Ukraine. Kyyiv, Ukraine: Publ. Rayevskoho, 343. [in Ukrainian]*
24. *Chebotarova, N., Nedostrelova, L. (2023). Duration of sunshine as one of the indicators of the country's solar energy resources. Polish international science journal, 8(64), 53-58. [in Ukrainian]*

Аналіз радіаційного режиму атмосфери для оцінки потенціальних геліоенергетичних ресурсів України

Лариса Недострелова [1]
к. геогр. н., доцент,
[1] Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,
Одеса, Україна;
Наталія Чеботарьова [1]
бакалавр кафедри метеорології та кліматології

Сонячна енергія впевнено завойовує стійкі позиції у світовій енергетиці. В теперішній час завдяки розробці конструкцій геліоустановок, експлуатація яких в окремих фізико-географічних районах економічно доцільна, перспективи використання променистої енергії Сонця стали більш конкретними. Але це в свою чергу потребує від дослідників детального вивчення енергетичних ресурсів окремих регіонів Земної кулі для встановлення їх енергетичного потенціалу. Метою статті є виявлення особливостей радіаційного режиму атмосфери для оцінки геліоенергетичних ресурсів України. Використання сонячної енергії залежить, насамперед, від географічного положення території, а від рівня сонячної радіації буде залежати ефективність сонячних установок. Тому необхідно проаналізувати перспективність використання сонячної радіації у різних областях території України залежно від їх географічного розташування, хмарності та періоду року. Для визначення потенційних геліоенергетичних ресурсів тієї чи іншої території, обґрунтування техніко-конструкторських показників різних геліосистем, оцінки економічної ефективності їх експлуатації у різні сезони року і різний час доби в певному місці, необхідно мати набір показників сонячного кадастру. В дослідженні представлено аналіз величин сумарної сонячної радіації за різних умов стану неба та тривалості сонячного сяйва для регіонів України за різні періоди. Для досягнення мети обрано метеорологічні станції в різних регіонах країни. Аналіз потоків сумарної радіації на території України за різні періоди за різних умов стану неба показує, що максимальні суми є характерними для Одеси, мінімальні – для Ковеля. Річні розподіли мають чітко виражений характер з максимумом в червні та в липні. Суми сумарної радіації відрізняються за різних умов стану неба для різних регіонів: влітку ці зміни коливаються в межах 10-30 %, взимку ці показники можуть змінюватися в 1,5-2,5 рази, особливо в період 1991-2020 рр. Річні суми сумарної радіації загалом є меншими в період 1961-1990 рр. Аналіз тривалості сонячного сяйва показує, що найбільші показники є характерними для Одеси. Криві річного ходу мають схожу структуру для різних періодів для всіх станцій з максимумами в червні-липні, мінімумами в грудні. Отримані результати дослідження радіаційного режиму дають можливість стверджувати, що енергетичний потенціал України є перспективним для забезпечення паливно-енергетичного комплексу і подальшого розвитку галузі сонячної енергетики країни.

Ключові слова*: сумарна сонячна радіація, тривалість сонячного сяйва, геліоенергетичні ресурси, альтернативна енергетика, річні показники, багаторічний розподіл, кліматичні норми, потоки сонячної радіації за умов ясного неба, потоки сонячної радіації за середніх умов хмарності.*

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу
Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 22 квітня 2025 р.
Прийнята 28 травня 2025 р.

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-24
УДК 556.18(282.247.7)(262.5)

Надійшла 10 вересня 2025 р.
Прийнята 28 жовтня 2025 р.

Сучасний водний стік великих річок України, які впадають у північно-західну частину Чорного моря

Валерія Овчарук
д. геогр. н., професор, завідувач кафедри гідрології суші,
Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, Одеса, Україна,
e-mail: valeriya.ovcharuk@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-5654-3731

У контексті сучасних кліматичних змін та зростання антропогенного навантаження прогнозування стану прибережних вод Чорного моря потребує достовірної оцінки водності великих річок України, від стоку яких залежить формування термохалінної структури та динаміки вод Північно-західної частини Чорного моря. Метою дослідження є аналіз сучасних тенденцій водного стоку в пригирлових ділянках Дніпра, Південного Бугу, Дністра й Дунаю для подальшого уточнення граничних умов числових гідротермодинамічних моделей та надання даних для системи кліматично-розумних рішень, що сприяє досягненню ЦСР-6 (чиста вода та санітарія) та ЦСР-13 (дії щодо зміни клімату), підтримуючи прийняття обґрунтованих рішень у водокористуванні та управлінні ризиками. Використано багаторічні гідрологічні ряди спостережень (1981–2021 рр.) та оперативні дані до 2024 року, що зберігаються в лабораторії гідрологічної інформації ОНУ та надаються Українським гідрометцентром. Застосовано гідролого-генетичний аналіз часових рядів, статистичні методи, побудову різницевих інтегральних кривих та визначення типових внутрішньорічних розподілів стоку для характерних за водністю років. Показано, що всі досліджувані річки перебувають у фазі тривалої маловодності, проте її початок і вираженість різняться. Для Південного Бугу після 2010 року зафіксовано різке й стійке зменшення стоку, який у 2024 р. становить лише третину середнього багаторічного значення. На Дніпрі тривала маловодна фаза спостерігається з 2010-х років, двічі (2015, 2020 рр.) досягаючи історичних мінімумів. Стік Дністра та Дунаю також характеризується циклічною мінливістю з домінуванням маловодних періодів упродовж останнього десятиліття. Для кожної річки визначено внутрішньорічні розподіли стоку для багатоводних, середньоводних і маловодних років, що є критично важливим для коректного завдання граничних умов у моделях D-Flow FM. Усі великі річки України, що впадають у Чорне море, нині перебувають у фазі стійкого маловоддя, що суттєво впливає на обсяги надходження прісної води до Північно-західної частини моря та має бути враховано під час гідродинамічного моделювання. Для сучасних умов рекомендаційно використовувати типові схеми маловодних років із урахуванням можливих відхилень у межах фактичних багатоводних сценаріїв. Результати дослідження можуть слугувати основою для розробки та впровадження ЦСР у межах ЦСР-6 і ЦСР-13, що забезпечують адаптивне управління водними ресурсами та підтримку рішень у боротьбі зі зміною клімату.

***Ключові слова**: водний стік, маловодна фаза, гідрологічний режим, Дніпро, Південний Буг, Дністер, Дунай, Чорне море, моделювання, ЦСР-6, ЦСР-13.*

Як цитувати: Овчарук Валерія (2025). Сучасний водний стік великих річок України, які впадають у північно-західну частину Чорного моря. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*, (63), 312-331. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-24

In cites: Ovcharuk Valeriya (2025). Modern runoff of the major rivers of Ukraine into the Northwestern part of the Black Sea. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 312-331. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-24 [in Ukrainian]

Вступ. У процесі моделювання стану прибережних морських вод та оцінювання впливу річкового стоку великих річок постає завдання визначення об'ємів надходження прісної води й прогнозування їх можливих змін у майбутньому. В Одеському національному університеті імені І.І. Мечникова разом з Інститутом морської біології НАН України під керівництвом проф. Тучковенко Ю.С. виконується науково-дослідна розробка «Діагноз та прогноз океанографічних умов в акваторіях Чорного та Азовського морів для забезпечення гідрометеорологічної безпеки України» (державний реєстраційний номер 0124U000771 за фінансування МОН України). В процесі дослідження обґрунтована оновлена версія автоматизованого модельного комплексу для діагнозу і прогнозу океанографічних характеристик в акваторіях північно-західній частини Чорного моря (ПнЗЧМ) у складі числової гідротермодинамічної моделі нового покоління D-Flow FM (Delft3D Flow Flexible Mesh), використання якої передбачає також оцінку впливу зміни водності великих річок, які значною мірою визначають просторово-часову мінливість температури і солоності, термохалінну структуру вод [1-3].

На території Північно-західної частини Чорного моря (ПЗЧМ) в межах України знаходяться гирла найбільших її річок – Дніпра, Південного Бугу, Дністра і Дунаю (рис. 1). В останні роки у зв'язку зі зміною клімату та зростанням антропогенного навантаження водний стік річок на півдні України зазнає суттєвих змін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оцінці впливу змін клімату на водний стік річок присвячено велика кількість сучасних гідрологічних досліджень, як в Україні, так й в світі в цілому.

Перш за все необхідно відзначити серію досліджень під керівництвом проф. Блошля [5-7]. Об'єднання даних по максимальному стоку річок Європи дозволили колективу авторів виявити регіональні тенденції та виділити області з різною їх направленістю. Результати, отримані з найпов-

© Ovcharuk Valeriya, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



Рис. 1. Картосхема Північно-західної частини Чорного моря (ПЗЧМ) [4] /
Fig. 1. Schematic map of the north-western part of the Black Sea (NWBS) [4]

нішої на сьогодні бази даних європейських повеней, свідчать про те, що: збільшення кількості осінніх та зимових опадів призвело до збільшення кількості повеней у північно-західній Європі; зменшення кількості опадів та збільшення випаровування призвели до зменшення кількості повеней у середніх та великих водозбірних басейнах у південній Європі; а зменшення снігового покриву та танення снігу внаслідок тепліших температур призвело до зменшення кількості повеней у східній Європі. Регіональні тенденції стоку води під час повеней у Європі коливаються від збільшення приблизно на 11 відсотків за десятиліття до зменшення на 23 відсотки [5,6]. В подальшому колектив авторів [7] зосередив свою увагу на дослідженні мегаповеней та закономірностей їх виникнення.

Із сучасних робіт вітчизняних авторів щодо досліджень середнього багаторічного стоку річок України та впливу на них зміни клімату можна відмітити монографічні видання Н. С. Лободи [8], В. І. Вишневського, О. О. Косовця [9, 10], В. В. Гребеня [11]. Зокрема Є.Д. Гопченком та Н. С. Лободою на початку 2000-х років проведено оцінювання природних водних ресурсів України за методом водно-теплового балансу [12], в подальшому під керівництвом Н.С. Лободи із співавторами [13-15] проведено ряд досліджень щодо моделювання впливу змін клімату на водні ресурси України.

Сучасне узагальнення середнього багаторічного стоку річок України наведене у роботі [15], де представлена карта ізоліній, побудована за допомогою аналітичних функцій ГІС. Карта базується на даних 389 гідрологічних постів. Розглянутий період спостережень – від їх початку до 2015 р. включно.

У монографії [16] установлено, що природні водні ресурси Півдня України періоду 2021-2050 рр. у кліматичних умовах сценарію RCP4.5 будуть зменшуватися на 20-30 % у Приазов'ї та на 30-40 % на території північно-західного Причорномор'я; за сценарієм RCP8.5 природні водні ресурси Півдня України зменшяться на 50-70% у межах північно-західного Причорномор'я та на 40-50 % у межах Приазов'я. Таким чином, зміни клімату на Півдні України можуть поставити під загрозу можливість відновлення водних ресурсів та приведення їх до доброго екологічного стану у відповідності із вимогами Водної Рамкової Директиви.

У роботі [17] досліджено вплив зміни клімату на доступність води по всій Україні за допомогою глобальних гідрологічних моделей. Результати показують збільшення кількості опадів до 10% за RCP 2.6 та змінні зміни від -14% до +10% за RCP 8.5 до кінця століття. Прогнози показують зменшення середньорічного річкового стоку в більшості басейнів на середній (2040–2070) та віддалений (2071–2100) періоди за обома RCP, причому зниження є сильнішим за RCP 8.5. Сезонні зміни характеризуються зменшенням літніх місяців та невеликим або помірним збільшенням зимових місяців у більшості басейнів. Найбільше зниження середньорічного стоку прогнозувалося для басейнів Прип'яті, Південного Бугу та Дністра, сягаючи до -30% до кінця століття за RCP 8.5.

Окремо слід відмітити регіональні дослідження щодо впливу змін клімату на стік річок. Так, наприклад, у [18] порівнюється режим повеней річок в Україні та Австрії за останні десятиліття, автори показують, що в Австрії спостерігається тенденція до зростання літніх повеней, пов'язаних зі збільшенням кількості опадів, натомість у низинних районах України спостерігається чітке зменшення весняних повеней, пов'язане з меншим сніговим покривом у кліматі, що потеплішає. З іншого боку, в Українських Карпатах, де повені відбуваються протягом року, збільшення частки рідких опадів у холодний період року призводить до більш ранніх повеней та збільшення ймовірності повеней взимку.

Слід відзначити й низку публікацій останніх років, в яких розглянуто характеристики середнього річного, мінімального і максимального стоку води окремих територій чи річкових басейнів України [19-27].

Таким чином, проведений короткий аналіз стану вивчення питання сучасного стоку річок України показав велику різноманітність висновків та необхідність подальшого дослідження тенденцій, зокрема у об'ємах стоку великих річок, які впадають в Чорне море, на сучасних вихідних даних.

Матеріали та методи дослідження. Для вирішення поставленої задачі використані архівні дані, які зберігаються в навчально-науковій лабораторії гідрологічної інформації та розрахунків на кафедри гідрології суші факультету гідрометеорології і екології ОНУ. Лабораторія гідрологічної інформації та розрахунків нараховує близько 50000 примірників режимної і додаткової літератури, матеріалами гідрологічних та метеорологічних багаторічних спостережень. Починаючи з 1991 року щорічні дані про режим та ресурси поверхневих вод суші, які опубліковані в Державному водному кадастрі Гідрометеорологічної служби України, зберігаються в лабораторії гідрологічної інформації та розрахунків як у роздрукованому вигляді, так і в електронному. Такі багаторічні матеріали спостережень на даний час кафедра отримує в рамках договору між ЦГО імені Бориса Срезневського ДСНС України і Одеським національним університетом ім. І.І. Мечникова (за №4 від 09.12.2024 р., що діє до 31 грудня 2027 р.) про надання гідрометеорологічної інформації та інформації про стан довкілля.

Одержання багаторічної і поточної гідрометеорологічної інформації здійснюється також на основі гідрометеорологічних даних Українського гідрометцентру ДСНС України, що сформовані в автоматизованій програмі робочого місця інженера-гідролога (АРМгідро).

Для оцінки тенденцій водності великих річок України використані багаторічні дані по 2020 рік включно, а також оперативна інформація по 2024 рік. В процесі дослідження використані гідролого-генетичний аналіз часових рядів стоку та статистичні методи обробки вхідної гідрологічної інформації.

Результати та дискусія.

Оцінка водності в нижній частині річки Південний Буг за останні десятиліття. В гідрологічному відношенні р. Південний Буг вивчена достатньо добре, як показано на рис.2, станом на 2020 рік в басейні ведуться регулярні гідрологічні спостереження на 24 постах гідрометеорологічної служби ДСНС України. Для оцінки водності Південного Бугу та об'єму стоку, який стікає з його басейну, використані дані по посту №147 р. Південний Буг - смт Олександрівка, а також №164 р. Інгул - с. Новогорожене. На жаль на замикальному посту № 149 р. Південний Буг - м. Миколаїв вимірюються лише рівні води [28].

У довідковій літературі [28-31] при характеристиці гідрологічного режиму та водності Південного Бугу зазвичай використовують дані саме по посту р. Південний Буг- смт Олександрівка, який має більш ніж 100-річний період спостережень і в повній мірі характеризує водність всього басейну, тем не менш для найбільш точного представлення сумарного об'єму стоку у пригирловій частині при аналізі додано також об'єм із замикального поста на р. Інгул.

На рис. 3а представлений часовий хід об'ємів річного стоку за період з 1981 по 2024 рік включно для р. Південний Буг- смт Олександрівка, а на рис.3б сумарний об'єм враховуючи стік р. Інгул - с. Новогорожено. Як добре ілюструє рис.3б вклад р. Інгул у сумарний стік не є суттєвим і коливається в різні роки від 5 до 10%, при цьому коливання і тенденції його водності абсолютно синхронні з Південним Бугом. Отже надалі водність аналізується за даними поста р. Південний Буг-смт Олександрівка.

Аналізуючи динаміку річних об'ємів стоку, які виносить у Чорне море за останні десятиліття Південний Буг, можна констатувати що з 2010 року відбувається різке і достатньо стійке його зменшення (рис.3а). Так якщо у 2010 році сумарний річний об'єм для р. Південний Буг – смт Олександрівка спостерігався на рівні середньо багаторічного (норми) і становив 2,78 км^3, то станом на кінець 2024 року він складає лише 0,69 км^3, тобто більше ніж в ***3,5 рази менше***. Навіть з урахуванням додаткового об'єму з р.Інгул, сумарний об'єм становить лише 0,91км^3(рис. 3б). Таким чином, можна сказати що після досягнення мінімального за багаторічний період значення у 2020 році, використовуючи поточні дані з ресурсу АРМ-гідро, показано що тенденція до суттєвого

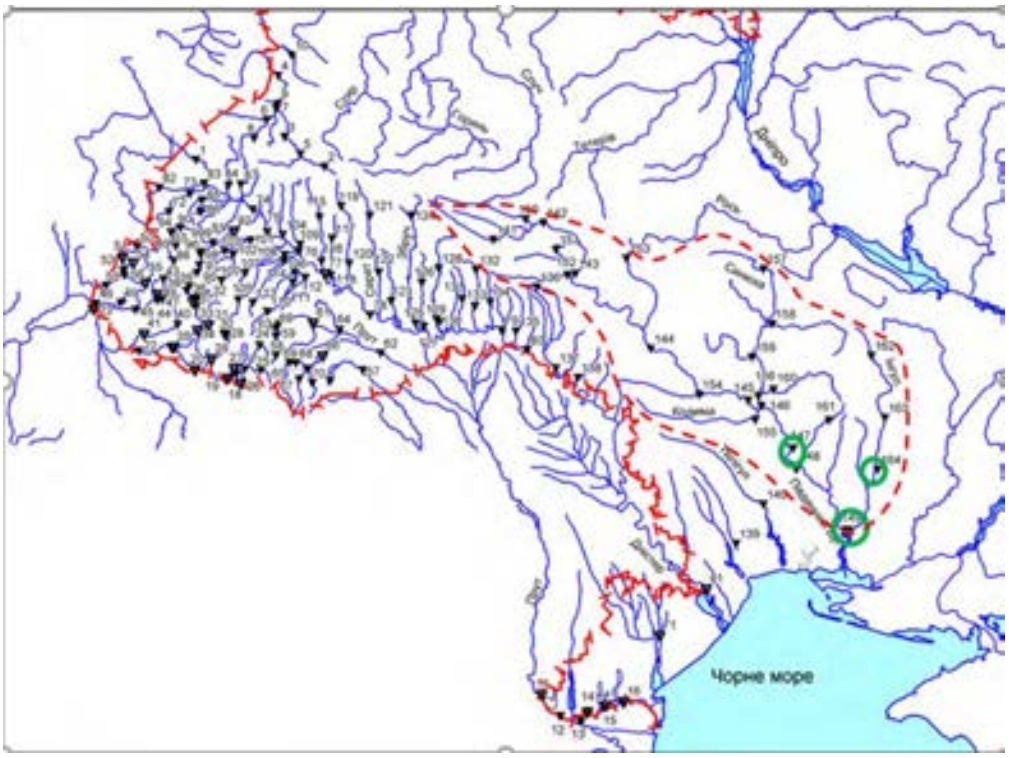


Рис. 2. Схема розташування гідрологічних постів на річках в басейні р. Південний Буг [28] /
Fig. 2. Location scheme of hydrological gauging stations on rivers in the Southern Bug River basin [28]

зменшення зберігається і натепер.

Представляє інтерес дослідити наскільки таке стійке зниження водності є характерним за багаторічний період. На рис. 4 представлений багаторічний хід об'ємів стоку, починаючи с 1914 року (за виключенням 1917 та 1941,1942,1944 рр.), тобто практично за 110 років.

Аналізуючи графік, представлений на рис.4а, можна побачити що природньо величини стоку коливались навколо середнього значення, утворюючи маловодні і багатоводні фази різної тривалості, але починаючи з 2007 року і дотепер спостерігається дуже тривала маловодна фаза, найбільша за період спостережень. Більш детально дослідити зміну фаз водності можна за допомогою побудови різницевої інтегральної кривої, яка представлена на рис. 4б. На представленому графіку видно, що від початку спостережень до середини 1960-х років цикли водності мали суттєво меншу тривалість ніж ми спостерігаємо на даний час. Так тривала багатоводна фаза почалась на досліджуваній річці з кінця 1960-х і тривала до 1988-1989рр, які вважаються роками початку впливу зміни клімату на водні ресурси України, після чого спостерігається нетривала маловодна фаза до 1995р. и знову багатоводна -до 2006 р. Починаючи з 2007 і по теперішній час триває маловодна, яка, як відмічене вище, є найбільш триваю, чітко вираженою, а спад кривої є найбільш крутим та чітко спрямованим.

Дослідження авторів монографій [16, 31-32], щодо ситуації з водністю річок на Півдні України, показують що у найближчі роки слід очікувати подальшого зменшення їх водності, зокрема Південного Бугу. Отже при моделюванні слід використовувати типовий розподіл для маловодного року, але для завдання граничних умов необхідно також мати інформацію і о можливих багатоводних роках.

Під типовим розподілом розуміється найчастіше повторюваний для даної річки (або групи річок) у багаторічному розрізі розподіл стоку протягом року. Типові схеми особливо придатні для класифікації річок та гідрологічного районування. Зазвичай використовуються моделі так званих фіктивних та характерних за водністю років (багатоводних, середньоводних або маловодних). Схеми фіктивного розподілу можна одержати в результаті осереднення витрат води, а потім подання їх у модульних коефіцієнтах або у відсотках від річної суми.

На рис. 5 представлений типовий внутрішньорічний розподіл середньомісячних витрат води для р. Південний Буг - смт Олександрівка за останні десятиліття, а на рис. 6, типові розподіли у відсотках для різних за водністю роках.

Аналізуючи представлені діаграми, можна відмітити, що у середній за водністю рік практично 50% стоку припадає на весняний період, а потім протягом року стік практично рівномірно розподіляється по місяцях (рис.6а). Для багатоводного року характерним є суттєве підвищення сто-

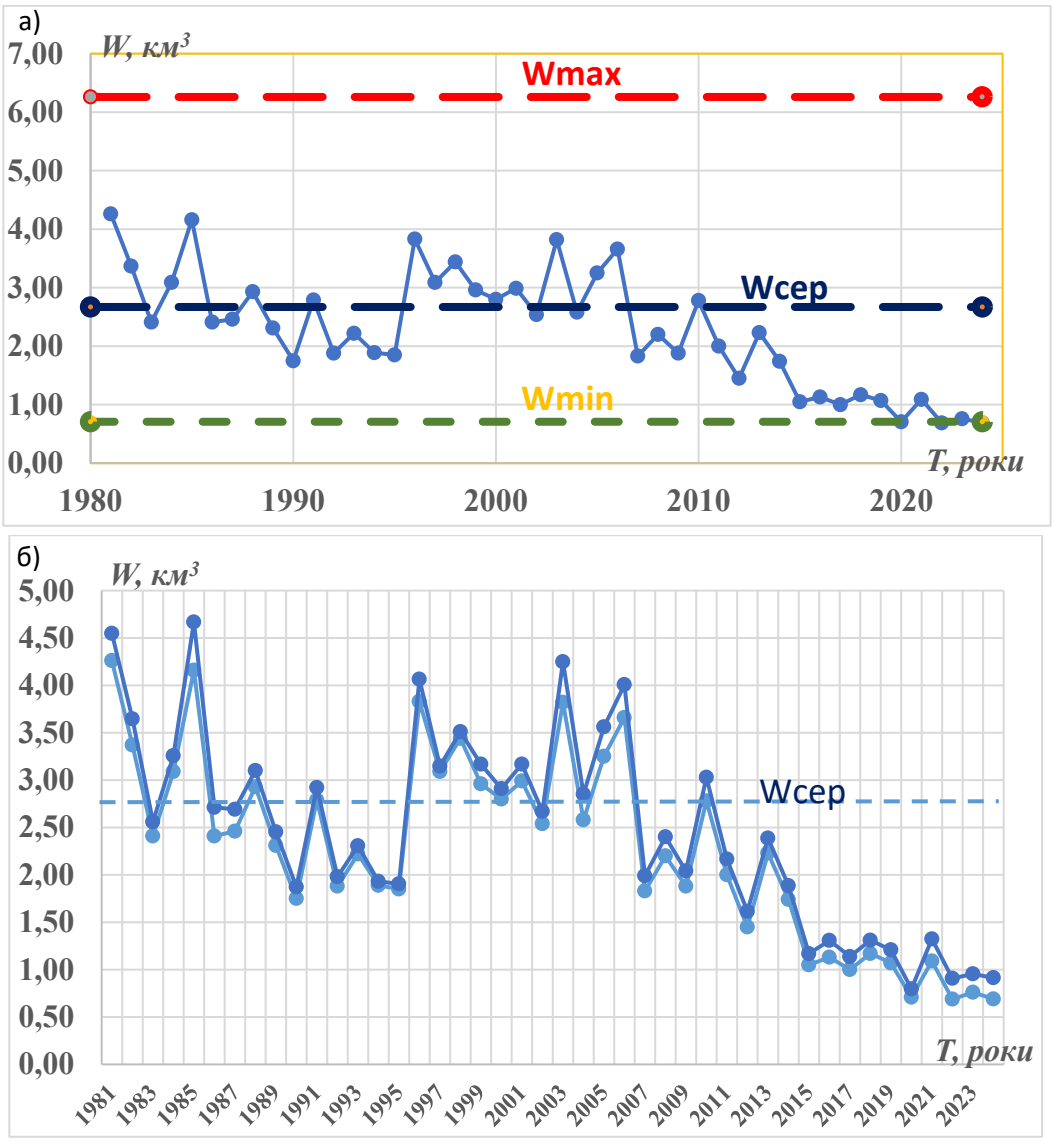


Рис. 3. Хронологічний графік ходу річних об'ємів стоку р. Південний Буг - смт Олександрівка (а) та сумарний об'єм стоку р. Південний Буг - смт Олександрівка та р. Інгул - с. Новогорожено (б) (1981-2024рр.) / Fig. 3. Chronological plot of annual runoff volumes of the Southern Bug River at Oleksandrivka settlement (a) and the cumulative runoff volume of the Southern Bug River at Oleksandrivka and the Inhul River at Novohorozhene village (b) (1981–2024)

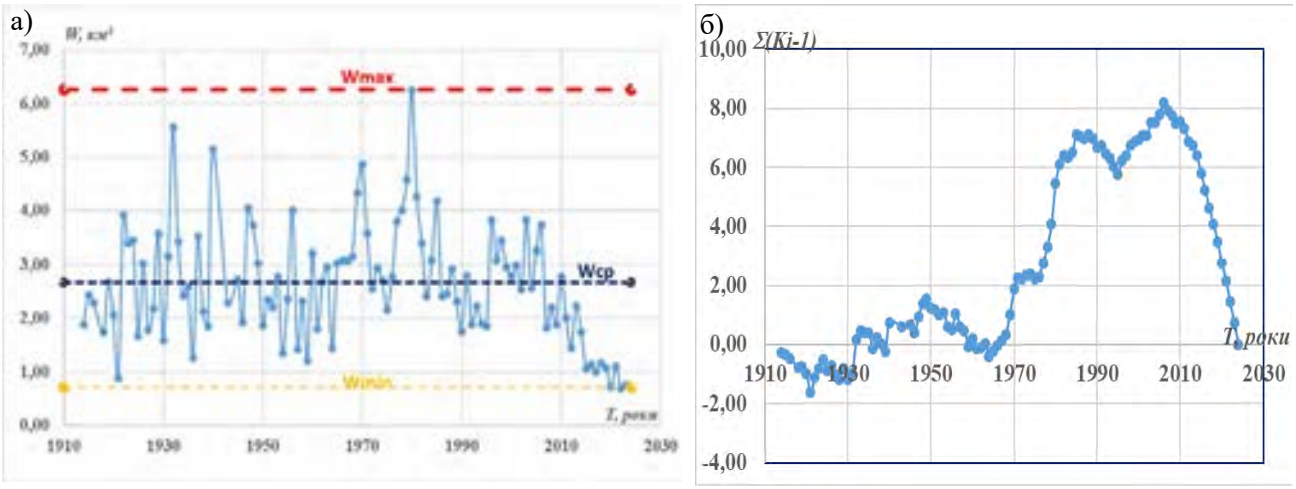


Рис. 4. Хронологічний графік ходу річних об'ємів стоку (а) та різницева інтегральна крива (б) для р. Південний Буг - смт Олександрівка (1914-2024рр.) / Fig. 4. Chronological plot of annual runoff volumes (a) and the residual mass curve (b) for the Southern Bug River at Oleksandrivka settlement (1914–2024)

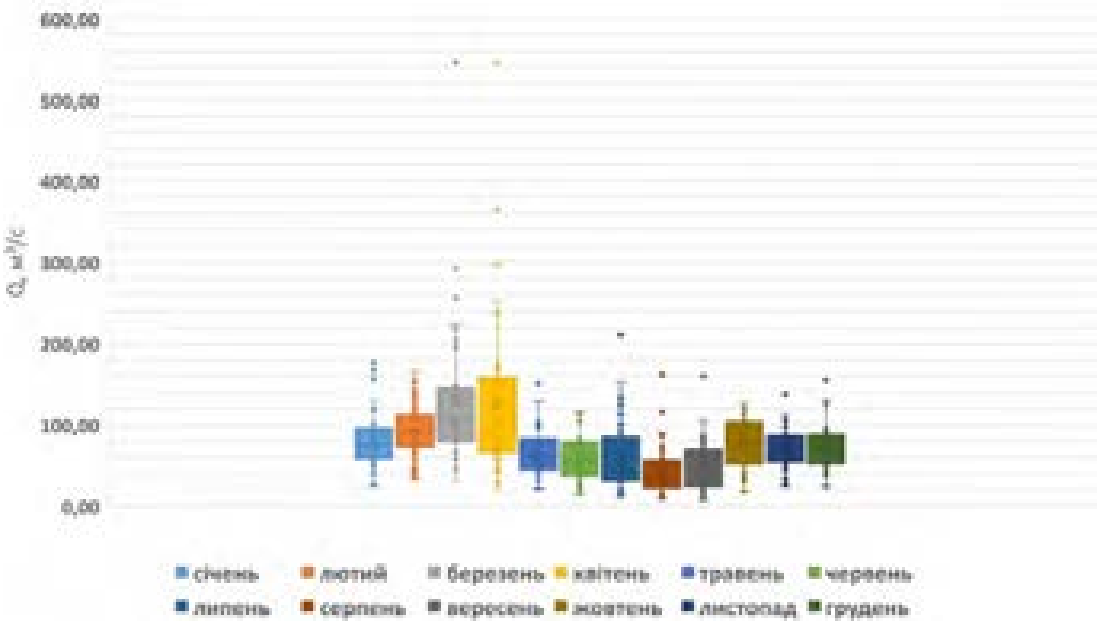


Рис. 5. Внутрішньорічний розподіл середньомісячних витрат води р. Південний Буг - смт Олександрівка за період 1981-2020 рр. / Fig. 5. Intra-annual distribution of mean monthly water discharge of the Southern Bug River at Oleksandrivka settlement for the period 1981–2020

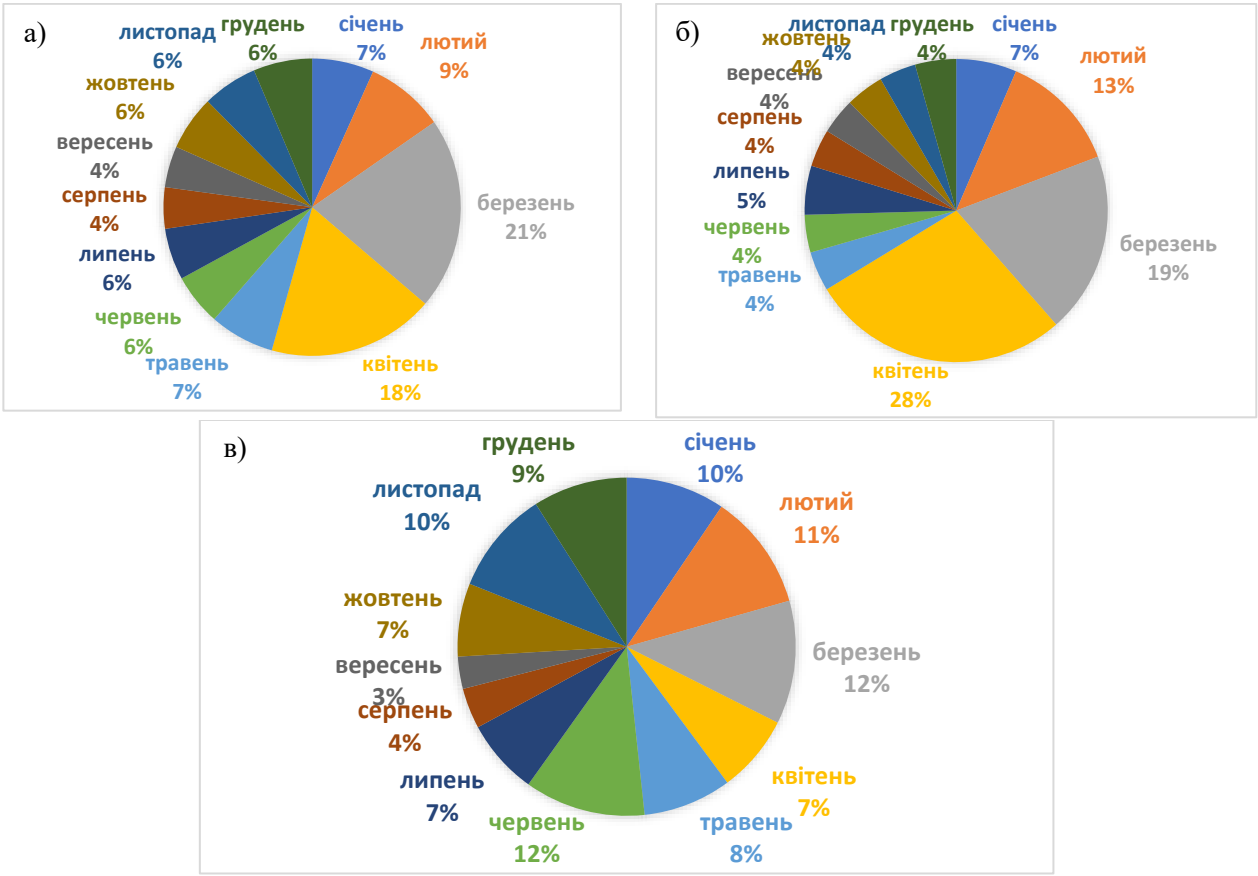


Рис. 6. Типовий розподіл об'ємів стоку (у %) р. Південний Буг - смт Олександрівка: а) середньоводний рік, б) багатоводний рік, в) маловодний рік / Fig. 6. Typical distribution of runoff volumes (%) of the Southern Bug River at Oleksandrivka settlement: (a) average-water year, (b) high-water year, and (c) low-water year

ку квітня (на 10%), а також незначний перерозподіл об'ємів між лютим і березнем (рис.6б). Характеризуючи маловодний рік (рис.6в), слід відмітити суттєвий перерозподіл стоку по місяцях; так стік березня і квітня зменшується в середньому на 10%, при цьому стік травня і червня збільшується, а величина стоку у вересні досягає мінімальних 3%; для зимових місяців в той же час є ха-

рактерним збільшення водності в межах 5%.

Як було сказано вище, крім моделі фіктивних типових років використовується також варіант фактичних характерних за водністю років. Такий розподіл представлений у табл. 1. На підставі аналізу середньомісячних даних та року в цілому за період з 1981 2020 рік, в якості середнього за водністю року обрано 2010 рік, багатоводного – 1981рік, а маловодний - 2020-й. Окремо представлений 1980 рік, коли спостерігались найбільші витрати, й відповідні об'єми стоку.

Мінливість водного стоку в нижній частині річки Дніпро в останні десятиліття до руйнування дамби Каховської ГЕС. Річка Дніпро є основною водною артерією України, її водні ресурси становлять понад 60 % усіх водних ресурсів країни. В районі басейну Дніпра у зв'язку з деякими різницями у режимах річок на досліджуваній території виділені 4 суббасейни, згідно вимог ВРД [33-34]: Прип'яті, Десни, Середнього і Нижнього Дніпра. В даному дослідженні для оцінки мінливості та об'ємів водного стоку у нижній частині Дніпра використані багаторічні дані спостережень по гідрологічному посту №7 р. Дніпро - Каховська ГЕС, а також по посту №9 р. Дніпро - м. Херсон (рис.7). В нижній частині Дніпра також функціонує пост №8 р. Дніпро – м. Нова Каховка, але він має ту ж саму площу, що й пост №7, при цьому витрати води на ньому не вимірюються, отже використовувати ці дані не має сенсу.

Таблиця 1 / Table 1

Типовий внутрішньорічний розподіл стоку для р. Південний Буг – смт. Олександрівка за характерними за водністю роками / Typical intra-annual runoff distribution of the Southern Bug River at Oleksandrivka for years of different water availability

Середній місячний об'єм стоку, км^3												
01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	Рік
Дуже багатоводний рік (1980 р.)												
0,70	1,38	2,09	3,01	0,46	0,44	0,57	0,43	0,41	0,44	0,43	0,47	**6,24**
Багатоводний рік (1981р.)												
0,42	0,40	0,69	0,41	0,35	0,22	0,27	0,18	0,22	0,33	0,36	0,42	**4,26**
Середній за водністю рік (2010 р.)												
0,27	0,31	0,37	0,28	0,13	0,23	0,27	0,08	0,10	0,24	0,23	0,26	**2,78**
Маловодний рік (2020 р.)												
0,07	0,08	0,08	0,05	0,06	0,08	0,05	0,03	0,02	0,05	0,07	0,06	**0,71**

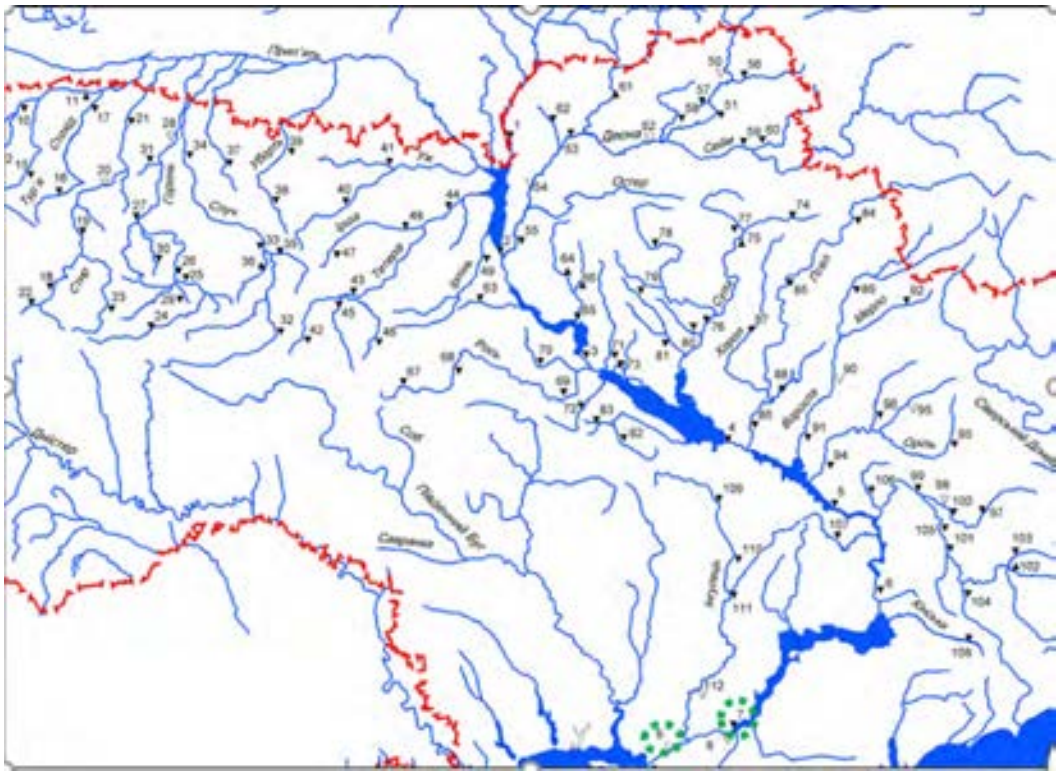


Рис. 7. Схема розташування гідрологічних постів нижній частині річки Дніпро[28] / Fig. 7. Location scheme of hydrological gauging stations in the lower reach of the Dnipro River [28]

На рис. 8 представлений багаторічний хід об'ємів річного стоку на гідрологічному пості р. Дніпро - Каховська ГЕС. За період з 1981 по 2021 рр. водність Дніпра характеризується достатньо рівномірними багато- та маловодними періодами, у порівнянні з нормою. Тем не менш, останнє десятиріччя все ж таки вирізняється більш тривалою маловодною фазою, в межах якої об'єми стоку двічі досягали мінімальних значень за весь період спостережень - у 2015 та 2020 роках (рис. 8).

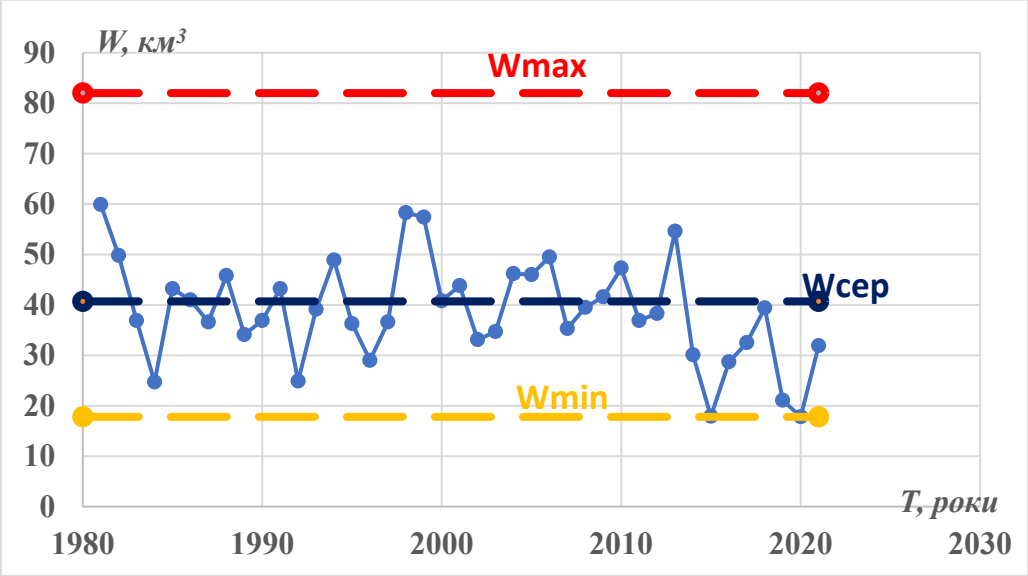


Рис. 8. Хронологічний графік ходу річних об'ємів стоку р. Дніпро - Каховська ГЕС (1981-2021 рр.) / Fig. 8. Chronological plot of annual runoff volumes of the Dnipro River at the Kakhovka Hydropower Plant (1981–2021)

На рис. 9 представлений багаторічний внутрішньорічний розподіл середньомісячних витрат води з межами їх максимальних та мінімальних величин за розглядуваний період (1981-2020). Найбільш багатоводними місяцями є квітень та травень, коли проходить основна хвиля весняного водопілля, а найменша водність характерна для періоду літньо-осінньої межені в серпні та вересні.

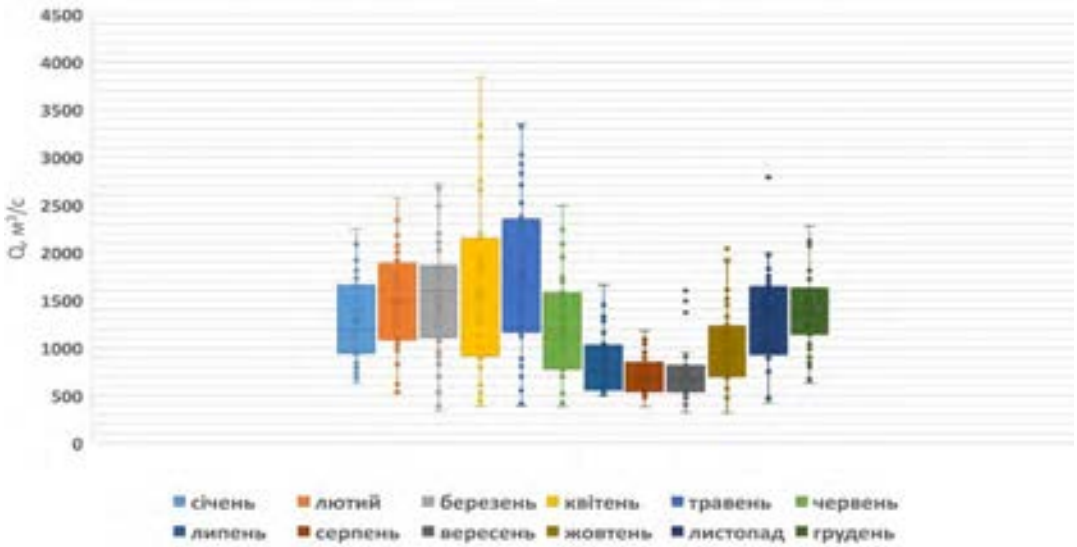


Рис. 9. Внутрішньорічний розподіл середньомісячних витрат води р. Дніпро - Каховська ГЕС за період 1981-2020 рр. / Fig. 9. Intra-annual distribution of mean monthly water discharge of the Dnipro River at the Kakhovka Hydropower Plant for the period 1981–2020

На рис. 10 представлені варіанти типового внутрішньорічного розподілу за схемою фіктивного розподілу для середньоводного, багатоводного та маловодного років у відсотках. Для середнього за водністю року (рис.10а) в період весняного водопілля (з лютого по червень) проходить більше 50% річного об'єму стоку; протягом літньо-осінньої межені стік по місяцям розподілений практично рівномірно в межах 5-6%; наприкінці року в період зимової межені спостерігається незначне підвищення стоку до 8-9% у листопаді-грудні. У багатоводний рік (рис. 10б) спос-

терігається збільшення стоку у квітні і травні при невеличкому зменшенні у лютому-березні при цьому доля весняного водопілля збільшується практично до 60%, а стік період зимової межені незначно зменшується. Суттєво перерозподіляється стік у маловодний рік (рис. 10в). Стік весняної повені зменшується до 40% при цьому максимум стоку приходиться на лютий, стік літньо-осінньої межені практично не змінюється, а величини стоку у період зимової межені збільшуються.

В табл. 2 представлений типовий розподіл по моделі характерних за водністю років. В межах останніх десятиріч середнім за водністю виявився 2000 рік, багатоводними 1981, а маловодним – 2020 р.

Як було відмічене вище, окрім стокового поста р. Дніпро - Каховська ГЕС в гирловій частині Дніпра ведуться спостереження за рівнями води на посту р. Дніпро – м. Херсон. В табл. 3 представлені дані про характерні рівні води за даними останнього випуску державного водного кадастру за 2016–2020 рр. та весь період спостережень [28].

Використовуючи поточну гідрометеорологічну інформацію з ресурсу АРМ-гідро, можна проаналізувати рівневий режим на посту р. Дніпро – м. Херсон за 2021-2024рр. На рис.11 представлений хронологічний хід рівнів води з 1.01.2021 по 23.12.2024 на посту р. Дніпро – м. Херсон.

Представлений графік чітко ілюструє величезний стрибок рівня в червні 2023 року внаслідок руйнування греблі Каховської ГЕС, який 8.06.2023 досяг відмітки 1059 см при максимальному спостереженому у 1970 році 665 см[35]. Однак цей випадок є прикладом катастрофічної по-

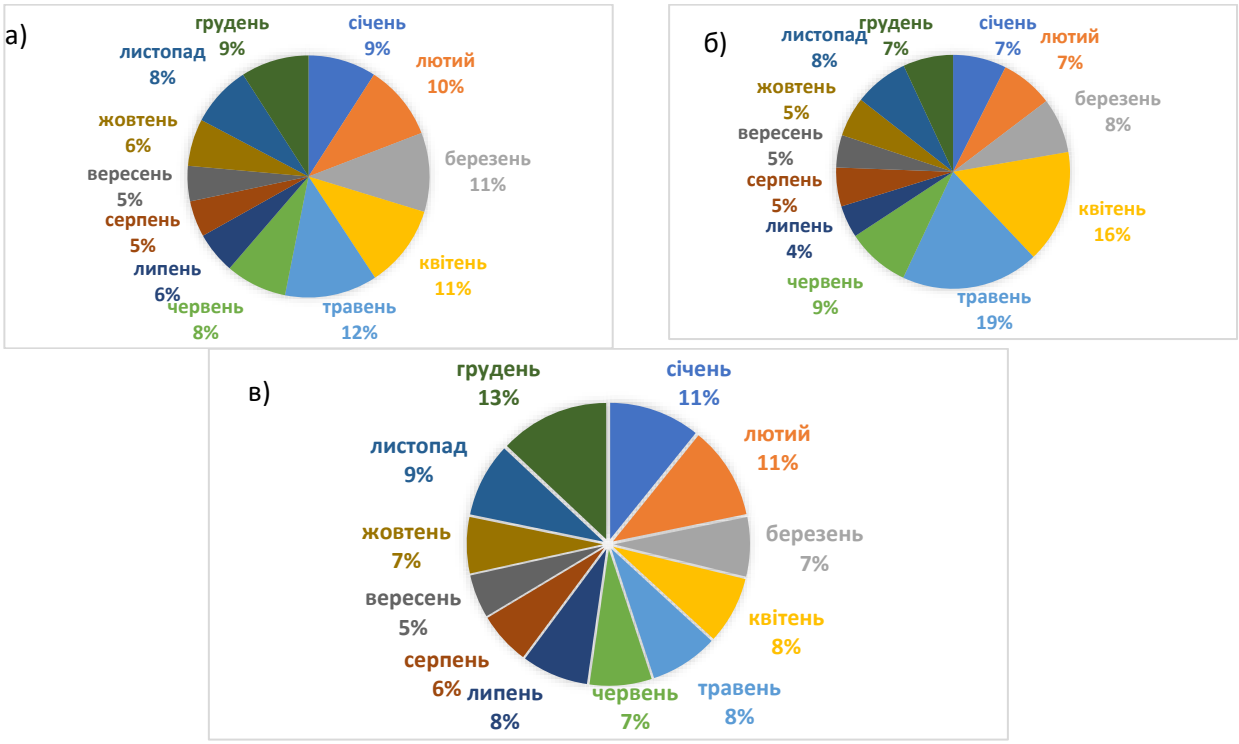


Рис. 10. Типовий розподіл об'ємів стоку (у %) р. Дніпро - Каховська ГЕС: а) середньоводний рік, б) багатоводний рік, в) маловодний рік / Fig. 10. Typical distribution of runoff volumes (%) of the Dnipro River at the Kakhovka Hydropower Plant: (a) average-water year, (b) high-water year, and (c) low-water year

Таблиця 2 / Table 2

Типовий внутрішньорічний розподіл стоку для р. Дніпро - Каховська ГЕС за характерними за водністю роками / Typical intra-annual distribution of runoff for the Dnipro River – Kakhovska HPP for years of different water availability

Середній місячний об'єм стоку, км^3												
01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	Рік
Багатоводний рік (1981р.)												
6,03	6,22	7,15	9,95	8,12	3,40	1,67	1,44	1,52	3,00	5,18	6,11	**59,9**
Середній за водністю рік (2000 р.)												
3,96	2,64	4,31	3,42	4,74	4,38	1,78	2,22	2,12	3,11	3,53	4,61	**40,8**
Маловодний рік (2020 р.)												
2,15	1,29	1,04	1,01	1,05	1,09	1,46	1,54	1,40	1,58	2,32	1,80	**17,8**

Таблиця 3/ Table 3

Характерні рівні води для гідрологічного посту р. Дніпро – м. Херсон [28] /
Characteristic water levels for the Dnipro River at the Kherson hydrological station [28]

Характеристика	Вищий рівень за рік		Нижчий рівень за рік		Коливання рівня за рік	
	см	дата	см	дата	см	дата
9. 80805. р. Дніпро – м. Херсон. Відмітка нуля поста – 5.00 м БС-77. 1963–2020 рр.						
Рівень середній	554		431		122	
вищий (найб.)	665	07,09.05.1970	462	06.01.2006	221	1970
нижчий (найм.)	513	02.12.1964	387	23.11.1975	82	2006

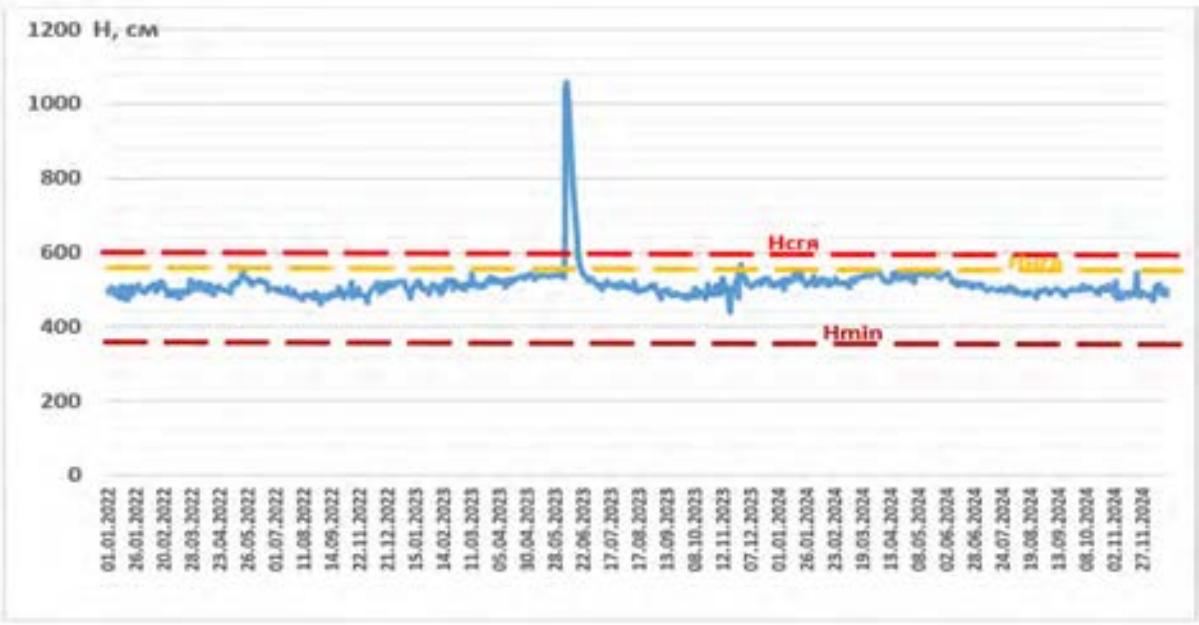


Рис. 11. Хронологічний хід рівнів на посту р. Дніпро – м. Херсон за період з 1.01.2021 по 23.12.2024.
Умовні позначки: Нсгя – рівень стихійного гідрометеорологічного явища;
Ннгя – рівень небезпечного гідрометеорологічного явища; *Hmin* – мінімальний рівень /
Fig. 11. Chronological water level variations at the Dnipro River gauge in Kherson
for the period 1 January 2021 to 23 December 2024

вені антропогенного походження і не характеризує природний рівневий режим нижньої частини Дніпра.

Для аналізу природного стану водності за останні 4 роки побудований хронологічний графік ходу рівнів з виключенням даних за період 6.06.2023-23.06.2023, який представлений на рис. 12. Аналізуючи природний режим рівнів за розглядуваний період, можна відмітити що коливання рівня відбуваються періодично, формуючи маловодні і багатоводні фази відповідно до типового водного режиму нижньої частини Дніпра, виключення представляють окремі випадки різкого підйому та спаду у жовтні 2023 року, які можуть бути викликані згінно-нагінними явищами у гирловій частині Дніпровсько-Бузького лиману.

Таким чином, аналіз хода рівнів після 2020 року показав відсутність суттєвих змін в його природньому режимі внаслідок руйнації греблі Каховської ГЕС, а отже дозволяє використовувати дані по посту р. Дніпро - Каховська ГЕС для характеристики типового внутрішньорічного розподілу нижньої частини Дніпра за останні десятиріччя.

Визначення типових за водністю років в нижній частині річки Дністер. За умовами живлення, водного режиму і фізико-географічних особливостей русло Дністра можна поділити на три частини: верхню – Карпатську (від верхів'я до с. Нижнє, гирло р. Тлумач, 2 км нижче гирла р. Золота Липа, довжиною 296 км), середню – Подільську (від с. Нижнє до м. Дубосари, довжиною 715 км) і нижню – Причорноморську (від греблі Дубосарської ГЕС до гирла, довжиною 351 км) [36].

Як добре ілюструє рис. 13, переважна більшість гідрологічних постів у басейні Дністра розташована в його верхній Карпатській частині та середній Подільській, що ж стосується нижньої



Рис. 12. Хронологічний хід рівнів на посту р. Дніпро – м. Херсон за період з 1.01.2021 по 23.12.2024 без урахування даних антропогенної повені внаслідок руйнування дамби Каховської ГЕС.
Умовні позначки: Нсгя – рівень стихійного гідрометеорологічного явища; *Ннгя* – рівень небезпечного гідрометеорологічного явища; *Нсер* – середньобагаторічний рівень Hmin – мінімальний рівень /
Fig. 12. Chronological water level variations at the Dnipro River gauge in Kherson for the period 1 January 2021 to 23 December 2024, excluding data from the anthropogenic flood caused by the Kakhovka HPP dam failure

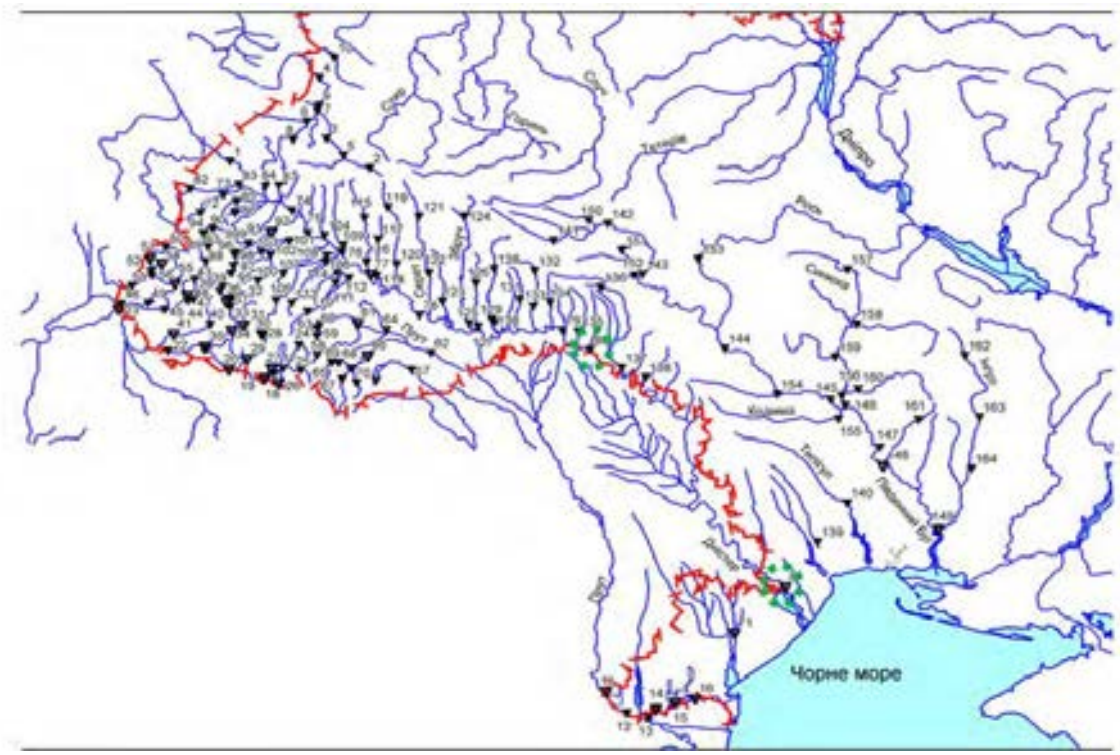


Рис. 13. Схема розташування гідрологічних постів нижній частині річки Дністер [28] /
Fig. 13. Location scheme of hydrological gauging stations in the lower reach of the Dniester River [28]

Причорноморської частини, то на території України тут розташований лише один пост р.Дністер-с.Маяки на якому ведуться багаторічні спостереження за рівнем води; найближчий постом, де вимірюються витрати води є р.Дністер - м. Могилів-Подільський.

В останньому випуску державного водного кадастру України [28] представлені характерні рівні води для гідрологічного посту р. Дністер – с. Маяки за період спостережень 1901–1917, 1926–1941, 1945–2020 рр., які весь цей час ведуться на базі гідроекологічного польового центру ОДЕКУ

(з 2024 р. ОНУ). Представлена таблиця в цілому характеризує водний режим в гирловій частині Дністра, але для моделювання необхідні більш детальні дані про типовий внутрішньорічний розподіл нижній частині річки Дністер.

За відсутності гідрологічних спостережень можна скористатись районуванням території України по типах внутрішньорічного розподілу стоку [37,38]. Однак аналізуючи ці дані, можна відмітити що вони вочевидь характеризує стік малих та середніх річок Причорномор'я, які дійсно пересихають влітку, але безпосередньо для гирлової ділянки самого Дністра такий розподіл застосувати не буде коректним.

Ретельний аналіз ситуації стосовно визначення розрахункових характеристик у гирловій частині Дністра представлено у дослідженні [37], де зокрема відмічається, на водність нижньої частини Дністра, починаючи з 1986р., має вплив Дністровська ГЕС, яка розташована вище м. Могилів-Подільський. Як було показано вище, р. Дністер - м. Могилів-Подільський - це найближчий гідрологічний пост, де ведуться спостереження за стоком, при цьому водність гирлової ділянки Дністра головним чином залежить від скидів з Дністровських ГЕС, яка акумулює більшу частину об'єму стоку, що формується на водозборі Дністра. Отже, як відмічається в [39], дані по стоку по цьому посту фактично відображають ті об'єми води, які скидаються через всі гідровузли Дністровської ГЕС. З метою дослідження взаємозв'язку між стоком на гідрологічному посту р. Дністер - м. Могилів-Подільський та рівнями води на р.Дністер - с.Маяки побудовані відповідні залежності, які представлені на рис. 14.

Аналіз хронологічного графіку, показує що

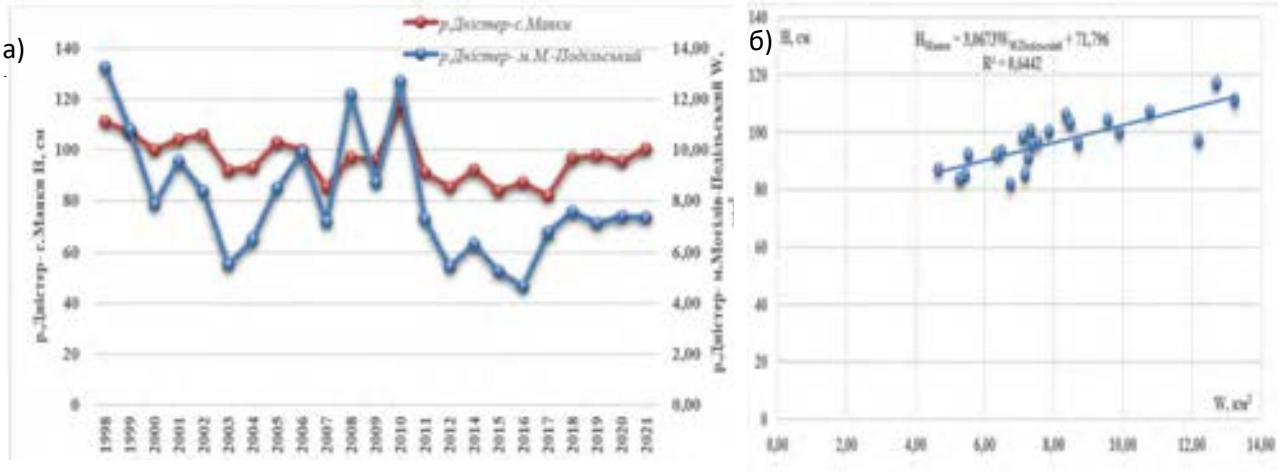


Рис. 14. Мінливість середньорічних рівнів води р. Дністер в с. Маяки та середньорічних об'ємів стоку в м. М.-Подільський (а), та зв'язок між ними (б) за період з 1998 по 2021 рр. /
Fig. 14. Variability of mean annual water levels of the Dniester River at Mayaky village and mean annual runoff volumes at Mohyliv-Podilskyi (a), and the relationship between them (b) for the period 1998–2021

коливання водності на двох досліджуваних гідрологічних постах є достатньо синхронними, а залежність представлена на рис.14б підтверджує наявність тісного зв'язку ($r=0.80$) між рівнями води р. Дністер в с. Маяки та об'ємами стоку в м. Могилів-Подільський.

Враховуючи отриману залежність та добру хронологічну збіжність, вважаємо можливим характеризувати внутрішньорічний розподіл стоку за даними гідрологічного поста р. Дністер – м. Могилів-Подільський. На рис. 15 представлений хронологічний хід річних об'ємів стоку для цього пункту спостережень за період 1981-2021 рр.

Аналізуючи представлений графік, можна відмітити, що коливання стоку р. Дністер за останні 40 років носять циклічний характер при якому багатоводні та маловодні змінюють одна одну достатньо рівномірно, однак останні 10 років стік характеризується маловодістю, що спостерігається й зі стоком рр. Дніпра та Південного Бугу.

На рис. 16 представлений типовий розподіл стоку за період 1981-2020рр. для різних за водністю роках. Для середнього за водністю року (рис. 16а) характерним є найбільша водність в теплу пору року - з березня по серпень, коли проходять хвилі весняного водопілля та дощових паводків, в холодний період водність знижується і достатньо рівномірно розподіляється восени, знижуючись до мінімальних відсотків в зимові місяці. В багатоводний рік розподіл стоку змінюється за рахунок зростання у березні та липні (рис. 16б) при цьому стік за теплий період року буде становить більше 70% від річного об'єму. Для маловодного року характерним є майже рівномірний розподіл стоку по місяцях протягом року з невеликим зростанням у квітні-травні (рис. 16в).

В табл. 4 представлений типовий внутрішньорічний розподіл стоку за характерними за во-

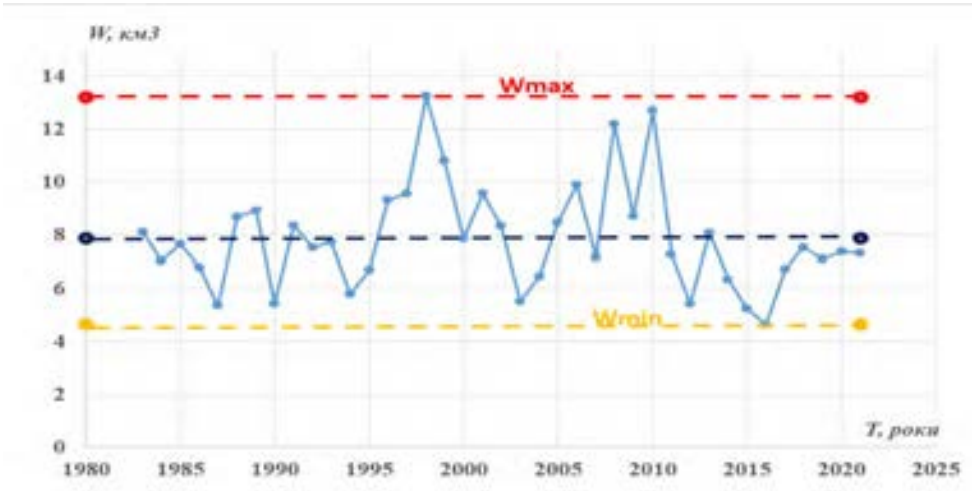


Рис. 15. Хронологічний графік ходу річних об'ємів
стоку р. Дністер – м. Могилів-Подільський (1981-2021рр.) /
Fig. 15. Chronological plot of annual runoff volumes of the Dniester River at Mohyliv-Podilskyi (1981–2021)

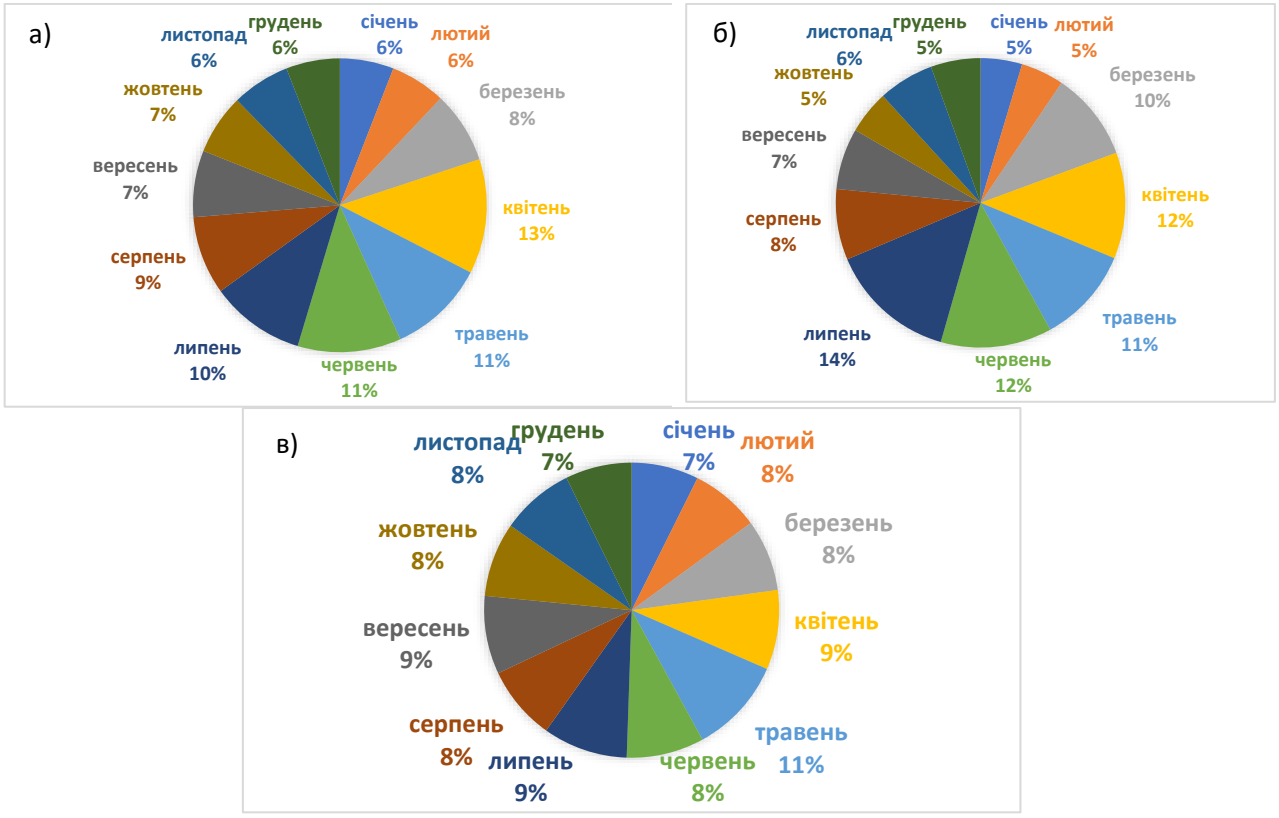


Рис. 16. Типовий розподіл об'ємів стоку (у %) р. Дністер – м. Могилів-Подільський: а) середньоводний рік, б) багатоводний рік, в) маловодний рік / Fig. 16. Typical distribution of runoff volumes (%) of the Dniester River at Mohyliv-Podilskyi: (a) average-water year, (b) high-water year, and (c) low-water year

дністю роками. Для р. Дністер – м. Могилів-Подільський за період з 1981 по 2020рр. багатоводним виявився 1998р. з об'ємом стоку за рік 13,25 км^3; до категорії середньоводного можна віднести 2000р. зі об'ємом стоку 7,85 км^3 за рік; маловодним виявився 2016 р. при цьому об'ємом стоку за рік склав лише 4,65 км^3. В табл.3 також представлений розподіл стоку по місяцях у відсотках для кожної категорії, який в цілому співпадає з представленим на рис. 16, але в окремі місяці відмінності можуть досягати до 10%.

Таким чином, при оцінці водності в замикальному посту р.Дністер – с.Маяки пропонується використовувати залежність, яка показана на рис.14 та типовий розподіл для р. Дністер – м. Могилів-Подільський. Однак, як показано в роботах [37, 39, 40], на рівневий режим гирлової частини Дністра мають також згінно-нагінні явища. Це питання буде окремо розглянуто у наступних етапах даного дослідження.

Таблиця 4 / Table 4

Типовий внутрішньорічний розподіл стоку для р. Дністер – м. Могилів-Подільський за характерними за водністю роками / Typical intra-annual runoff distribution of the Dniester River at Mohyliv-Podilskyi for years of different water availability

Середній місячний об'єм стоку, км^3/%												
01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	Рік
Багатоводний рік (1998р.)												
0,68	0,60	0,61	1,30	1,37	2,24	2,23	0,83	0,58	0,95	1,30	0,57	**13,25**
5,1	4,6	4,6	9,8	10,3	16,9	16,8	6,3	4,3	7,2	9,8	4,3	**100**
Середній за водністю рік (2000 р.)												
0,55	0,75	0,71	1,74	0,84	0,46	0,59	0,49	0,38	0,46	0,43	0,42	**7,85**
7,0	9,6	9,1	22,1	10,7	5,9	7,5	6,2	4,9	5,8	5,4	5,4	**100**
Маловодний рік (2016 р.)												
0,31	0,28	0,29	0,52	0,39	0,37	0,39	0,44	0,39	0,37	0,40	0,46	**4,65**
6,6	5,9	6,3	11,2	8,5	8,0	8,4	9,6	8,4	8,1	8,6	9,9	**100**

Оцінка сучасного стану водності на українській частині нижнього Дунаю. В даний час стандартна мережа гідрологічних спостережень на українській пригирловій частині р. Дунай складається з 6 річкових постів (рис.17), на чотирьох з них вимірюються рівні води, та лише на двох - №12 р. Дунай - м. Рені (гідроствор,54 миля) та №13 р. Дунай, Кілійське гирло - м. Ізмаїл (гідроствор,115 км) вимірюються витрати води [28].

Для аналізу водності нижньої частини Дунаю за останні десятиріччя використані дані державного водного кадастру України кадастру за 2016–2020 рр. та весь період спостережень [28], а також поточна гідрологічна інформація з ресурсу АРМ-гідро надана УкрГМЦ. Площа водозбору гідрологічних постів р. Дунай - м. Рені (гідроствор,54 миля) та р. Дунай, Кілійське гирло - м. Ізмаїл (гідроствор,115 км) відрізняється на 2000 км^2, але в масштабах загальної площі ця різниця не є досить суттєвою, отже доцільним буде проаналізувати стік на обох постах.

На рис. 18а представлений хронологічний

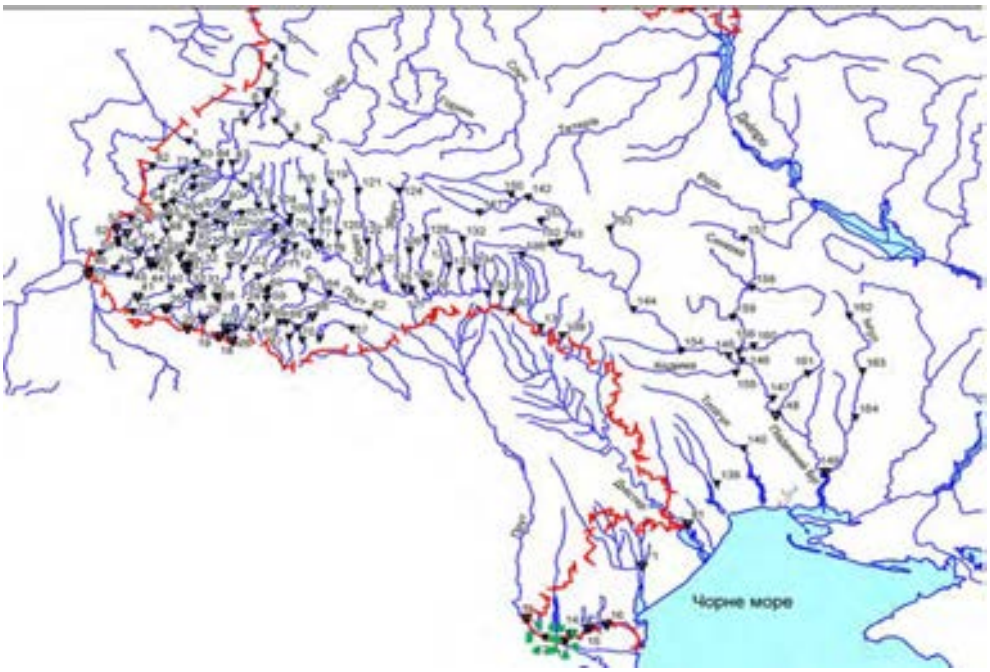


Рис. 17. Схема розташування гідрологічних постів на українській пригирловій частині р.Дунай [28] / Fig. 17. Location scheme of hydrological gauging stations in the Ukrainian delta section of the Danube River [28]

графік ходу річних об'ємів стоку для р. Дунай, Кілійське гирло - м. Ізмаїл (гідроствор,115 км), а на рис.18б аналогічний графік для гідрологічного поста р.Дунай - м. Рені (гідроствор,54 миля). Аналіз динаміки водності в дельтовій частині Дунаю на території України показує, що на обох досліджуваних постах коливання водності відбуваються синхронно; в межах досліджуваного періоду з 1983 по 1994 рр. спостерігалась маловодна фаза, далі з 1995 по 2002 багатоводна. В подальші

роки до 2015 року маловодні і багатоводні роки зміняли один одного з періодичністю 2-3 роки, після чого, починаючи з 2016 року і дотепер триває маловодна фаза.

З попередніх досліджень [41-43] гідрологічного режиму дельтової частини Дунаю відомо, що не зважаючи на меншу площу водозбору, саме стік на гідрологічному пості р. Дунай – м. Рені (гідроствор, 54 миля) характеризує об'єми стоку, які Дунай виносить у Чорне море, отже внутрішньорічний розподіл далі проаналізований саме за даними цього пункту спостережень.

На рис. 19 представлений внутрішньорічний розподіл середньомісячних витрат води для р. Дунай – м. Рені (гідроствор, 54 миля) за період 1981-2020рр. з якого чітко видно, найбільш багатоводними є весняні місяці, коли проходить водопілля, а також січень коли спостерігаються зимові паводки, найменша водність характерна для періоду літньо-осінньої межені.

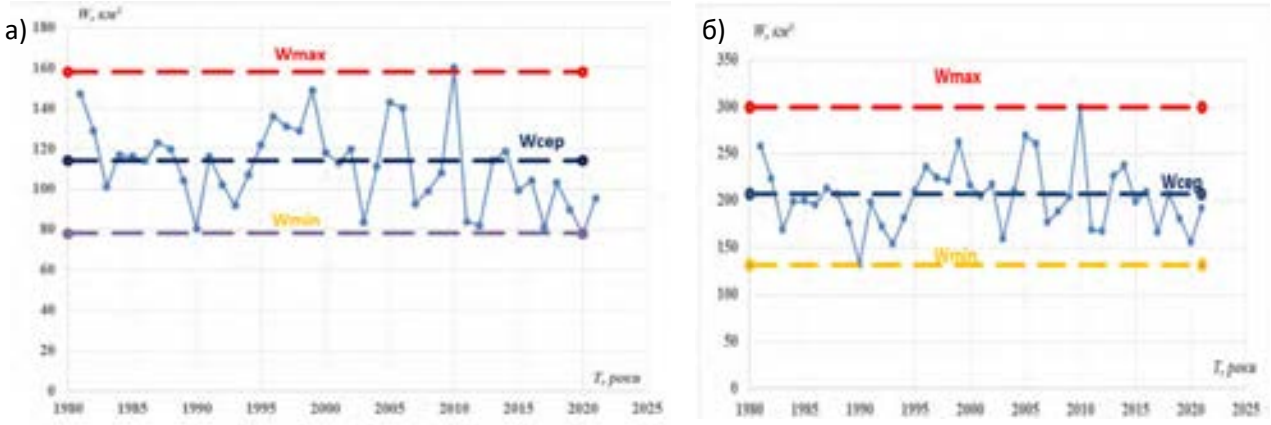


Рис. 18. Хронологічний графік ходу річних об'ємів стоку: а) р.Дунай, Кілійське гирло - м. Ізмаїл (гідроствор 115 км), б) р. Дунай – м. Рені (гідроствор, 54 миля)(1981-2021 рр.) /
Fig. 18. Chronological plot of annual runoff volumes: (a) Danube River, Kiliia Estuary at Izmail (river section 115 km), (b) Danube River at Reni (river section 54 miles) (1981–2021)

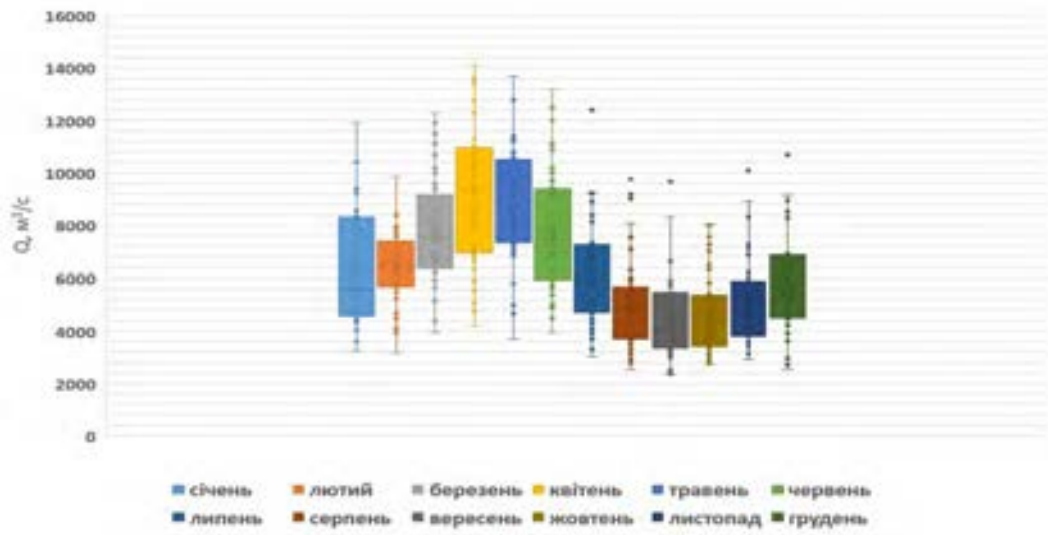


Рис. 19. Внутрішньорічний розподіл середньомісячних витрат води р.Дунай – м. Рені (гідроствор, 54 миля) за період 1981-2020рр. / Fig. 19. Intra-annual distribution of mean monthly water discharge of the Danube River at Reni (river section 54 miles) for the period 1981–2020

На рис. 20 представлений типовий розподіл для характерних за водністю років. Для середнього за водністю року (рис. 20а) найбільший стік спостерігається в березні-червні і сумарно становить 44%, далі протягом року стік розподіляється практично рівномірно з мінімальними відсотками у вересні та жовтні. Якщо розглянути приклад типового багатоводного року (рис. 20б), то можна відмітити, що стік у квітні дещо зменшується, у липні зростає; в результаті в період проходження весняного водопілля до якого додаються літні паводки сумарно проходить 50% річного об'єму стоку. Для типового маловодного року характерний практично рівномірний розподіл стоку протягом березня-липня (9-10% кожен місяць), після чого в період межені (серпень-жовтень) спостерігається найменший стік, а в зимовий період стік зростає, досягаючи 12% у грудні (рис. 20в).

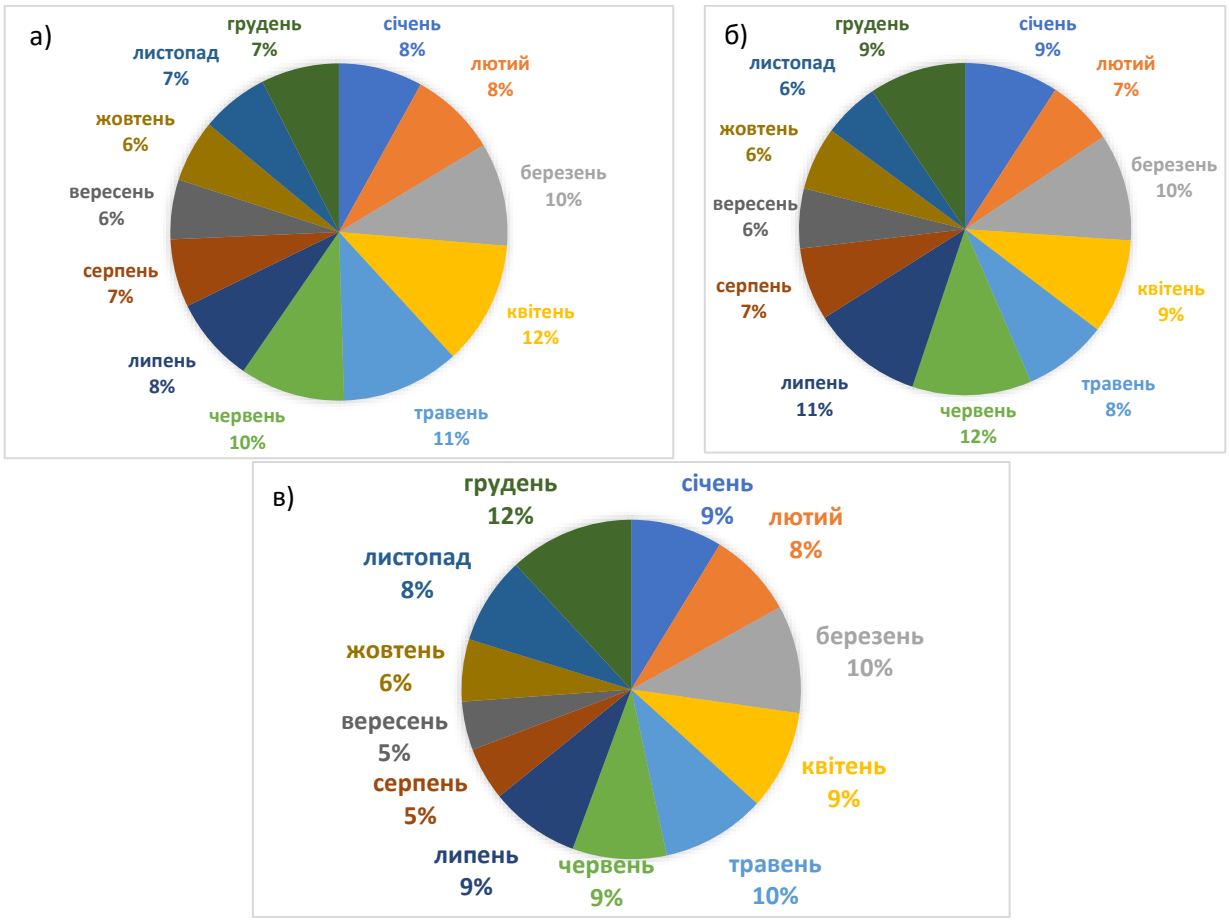


Рис. 20. Типовий розподіл об'ємів стоку (у %) р. Дунай – м. Рені (гідроствор, 54 миля): а) середньоводний рік, б) багатоводний рік, в) маловодний рік / Fig. 20. Typical distribution of runoff volumes (%) of the Danube River at Reni (river section 54 miles): (a) average-water year, (b) high-water year, and (c) low-water year

В табл. 5 представлений інший варіант внутрішньорічного розподілу – за характерними за водністю роками. Для досліджуваній частини Дунаю за останні 40 років в якості прикладу середнього за водністю року представлений 2016 р. з річним об'ємом стоку 209 км^3; багатоводним виявився 2010 рік з об'ємом стоку 299 км^3 ; маловодний рік представлений 1990 р. з об'ємом стоку 132 км^3.

Таблиця 5/ Table 5

Типовий внутрішньорічний розподіл стоку для р. Дунай – м. Рені (гідроствор, 54 миля) за характерними за водністю роками / Typical intra-annual runoff distribution of the Danube River at Reni (54th mile) for years of different water availability

Середній місячний об'єм стоку, км^3												
01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	Рік
Багатоводний рік (2010 р.)												
27,9	17,8	31,9	27,2	25,0	34,2	33,2	21,6	17,2	18,8	16,1	28,7	299
Середній за водністю рік (2016 р.)												
12,1	16,8	30,8	21,0	21,5	21,7	18,1	14,7	10,8	11,0	16,1	13,3	209
Маловодний рік (1990 р.)												
11,8	10,0	13,8	12,4	13,4	11,7	11,5	6,8	6,0	8,0	10,9	16,0	132

Висновки

- В дослідженні виконаний аналіз водності найбільших річок України, які виносять свої води у Чорне море, за останні десятиріччя з 1981 по 2021рр., а також проаналізована наявна поточна інформація до грудня 2024 року включно.
- Аналіз водності Південного Бугу показав, що починаючи з 2010 року відбувається різке зниження водного стоку, яке досягло мінімального за багаторічний період значення у 2020 році. Використовуючи поточні дані з ресурсу АРМ-гідро, показано що тенденція до суттєвого зменшення

зберігається і натепер.

- За період з 1981 по 2021 рр. водність Дніпра характеризується достатньо рівномірними багато- та маловодними періодами, у порівнянні з нормою. Тем не менш, останнє десятиріччя все ж таки вирізняється більш тривалою маловодною фазою, в межах якої об'єми стоку двічі досягали мінімальних значень за весь період спостережень - у 2015 та 2020 роках.
- Коливання стоку р.Дністер за останні 40 років носять циклічний характер при якому багатоводні та маловодні змінюють одна одну достатньо рівномірно, однак останні 10 років стік характеризується маловодістю, що спостерігається й зі стоком рр. Дніпра та Південного Бугу.
- Аналіз динаміки водності в дельтовій частині Дунаю на території України показує, що в межах досліджуваного періоду з 1983 по 1994 рр. спостерігалась маловодна фаза, далі з 1995 по 2002 багатоводна. В подальші роки до 2015 року маловодні і багатоводні роки змінялися один одного з періодичністю 2-3 роки, після чого, починаючи з 2016 року і дотепер триває маловодна фаза.
- В цілому проведене дослідження показує, на найбільших річках України на даний момент триває маловодна фаза, початок якої і тривалість різні, але останнє десятиріччя на всіх річках є маловодним.
- Враховуючи отримані результати, при моделюванні поточного стану водності рекомендується використовувати типовий розподіл для маловодного року.

Список використаних джерел

1. *Сриберко, А. В., Андріанова, О. Р., & Тучковенко, Ю. С. (2024). Термохалинна структура та методика розрахунків її просторового розподілу в діяльному шарі Чорного моря (249 с.). Одеса: ОДЕКУ. http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/13054/*
2. *Тучковенко, Ю. С., & Кушнір, Д. В. (2024). Моделювання поширення трансформованих вод річки Дніпро в акваторії Чорного моря в результаті штучного паводка, викликаного руйнуванням греблі Каховського водосховища. Перспективи гідроекологічних досліджень в контексті локальних та глобальних наслідків ведення воєнних дій: Збірник матеріалів IX з'їзду Гідроекологічного товариства України (с. 174–176). Дніпро: ДНУ.*
3. *Тучковенко, Ю. С., & Кушнір, Д. В. (2024). Діагноз і прогноз океанографічних умов в Чорному морі. Матеріали 79-ої звітної наукової конференції ОНУ (с. 10–13). Одеса: ОНУ. http://liber.onu.edu.ua/pdf/79_Conf_2024_FH&E.pdf*
4. *Wikipedia. (n.d.). Північнозахідна частина Чорного моря. https://surl.lt/puxsbi*
5. *Blöschl, G., et al. (2017). Changing climate shifts timing of European floods. Science, 357(6351), 588–590. https://doi.org/10.1126/science.aan2506*
6. *Blöschl, G., et al. (2019). Changing climate both increases and decreases European river floods. Nature, 573, 108–111. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6*
7. *Bertola, M., Blöschl, G., Bohac, M., et al. (2023). Megafloods in Europe can be anticipated from observations in hydrologically similar catchments. Nature Geoscience, 16, 982–988. https://doi.org/10.1038/s41561-023-01300-5*
8. *Лобода, Н. С. (2015). Моделювання впливу змін клімату на характеристики стоку річок України. У Кліматичні зміни та їх вплив на сфери економіки України (с. 451–482). Одеса: ТЕС.*
9. *Вишневський, В. І. (2000). Річки і водойми України (376 с.). Київ.*
10. *Вишневський, В. І., & Косовець, О. О. (2003). Гідрологічні характеристики річок України (324 с.). Київ.*
11. *Гребінь, В. В. (2010). Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз) (316 с.). Київ. https://geo.knu.ua/wp-content/uploads/2021/03/10_n_lit_gidrol.pdf.pdf*
12. *Гопченко, Є. Д., & Лобода, Н. С. (2001). Оцінювання природних водних ресурсів України за методом водно-теплового балансу. Наукові праці УкрНДГМІ, 249, 106–119.*
13. *Лобода, Н. С., & Козлов, М. О. (2020). Оцінка водних ресурсів річок України за сценаріями RCP4.5 та RCP8.5 на 2021–2050 роки. Український гідрометеорологічний журнал, 25, 93–104. https://doi.org/10.31481/uhmj.25.2020.09*
14. *Loboda, N. S., Tuchkovenko, Y. S., Kozlov, M. O., & Katynska, I. V. (2021). Assessment of River Water Inflow into the Sasyk Estuary-Reservoir According to RCP4.5 and RCP8.5 Climate Change Scenarios for 2021-2050. Journal of Geology, Geography and Geoecology, 30(2), 315–325. https://doi.org/10.15421/112128*
15. *Лук'янець, О. І., Ободовський, О. Г., Гребінь, В. В., Почаєвець, О. О., & Корнієнко, В. О. (2021). Просторові закономірності зміни середнього річного стоку річок України. Український географічний журнал, 1(113), 6–14. https://doi.org/10.15407/ugz2021.01.006*
16. *Овчарук, В. А., & Шакірзанова Ж.Р., (Ред.). (2024). Екстремальні гідрологічні явища на річках Півдня України: розрахунки і прогнози (674 с.). Одеса: ОДЕКУ. http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/13144/*
17. *Didovets, I., et al. (2020). Climate change impact on water availability of main river basins in Ukraine. Journal of Hydrology: Regional Studies, 32, 100761. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100761*
18. *Snizhko, S., Bertola, M., Ovcharuk, V., Shevchenko, O., Didovets, I., & Blöschl, G. (2023). Climate impact on flood changes – an Austrian-Ukrainian comparison. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 71(3), 271–282. https://doi.org/10.2478/johh-2023-0017*
19. *Ободовський, О. Г., Лук'янець, О. І., Гребінь, В. В., Почаєвець, О. О., & Корнієнко, В. О. (2019). Середній річний стік води в межах районів річкових басейнів України. Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія, 3(54), 65–66.*
20. *Гребінь, В. В., & Лук'янець, О. І. (2019). Середній річний стік річок басейну Дністра та його багаторічна мінливість. Матеріали конференції «Річки та лимани Причорномор'я на початку XXI сторіччя» (с. 46–48). Одеса.*

21. Ободовський, О. Г., Лук'янець, О. І., Москаленко, С. О., & Корнієнко, В. О. (2020). Узагальнення середнього річного стоку води річок відповідно до гідрографічного районування України. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (51), 158-170. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2019-51-11
22. Ovcharuk, V., Gopchenko, E., Kichuk, N., Shakirzanova, Z., Kushchenko, L., & Myroschnichenko, M. (2020). Extreme hydrological phenomena in the forest steppe and steppe zones of Ukraine under the climate change. Proceedings of IAHS, 383, 229–235. https://doi.org/10.5194/piahs-383-229-2020
23. Кущенко, Л. В., Овчарук, В. А., Прокоф'єв, О. М., Гопцій, М. В., & Андреєвська, Г. М. (2021). Мінімальний та екологічний стік річок Півдня України. Екологічні науки, 2(35), 30–36. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.2-35.5
24. Ovcharuk, V., & Gopchenko, E. (2022). Engineering substantiation of maximum river runoff characteristics… In Ecological Significance of River Ecosystems (351–382). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85045-2.00018-2
25. Лобода, Н. С., & Розвод, М. Р. (2025). Оцінка змін вертикальної зональності річного стоку гірського Дністра. Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія, 3(77), 20–32.
26. Шакірзанова, Ж. Р., Овчарук, В. А., Докус, А. О., Кущенко, Л. В., & Тимко, О. С. (2022). Ймовірнісно-прогностичний метод для визначення меженних витрат води річок Південного Бугу, Причорномор'я та Нижнього Дніпра. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 57, 251–267. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-19
27. Шакірзанова, Ж. Р., & Блага, А. О. (2025). Прогноз водності річок при дефіциті водних ресурсів на Півдні України. Матеріали конференції «Кліматичні зміни…» (97–100). Одеса. https://www.doi.org/10.32782/19092025
28. Державний водний кадастр. (2017). Багаторічні дані про режим та ресурси поверхневих вод суші (за 2016–2020 рр. та весь період спостережень). Ч. 1. Річки. Вип. 2. Басейн Дніпра: довідкове видання (268 с.). Київ.
29. Державне агентство водних ресурсів України. (2025). План управління річковим басейном Південного Бугу (2025–2030). https://davr.gov.ua/fls18/PURB_PivdennyiBuh.pdf
30. Вишневський, В. І., & Куцій, А. В. (2022). Багаторічні зміни водного режиму річок України (252 с.). Київ: Наукова думка.
31. Хільчевський, В. К., Чунарьов, О. В., Ромась, М. І., Яцюк, М. В., & Бабич, М. Я. (2009). Водні ресурси та якість річкових вод басейну Південного Бугу (184 с.). Київ: Ніка-Центр. https://irbis-nbuv.gov.ua/ulib/item/ukr0000019109
32. Овчарук, В. А. (2020). Максимальний стік весняного водопілля рівнинних річок України (300 с.). Одеса: Гельветика.
33. Водна Рамкова директива ЄС 2000/60/ЄС. (2006). Водна Рамкова директива ЄС 2000/60/ЄС (240 с.). Київ.
34. Гребінь, В. В., та ін. (2013). Методики гідрографічного районування України (55 с.). Київ: Інтерпрес.
35. Tuchkovenko, Y., Kushnir, D., & Ovcharuk, V. (2024). Modeling the distribution of transformed waters of the Dnipro River in the Black Sea following the artificial flood caused by the Kakhovka dam destruction. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Природничо-географічні дослідження рельєфу, клімату та поверхневих вод: сучасний стан та перспективи розвитку» (2–4 жовтня 2024 р., Київ, Україна) (с. 54). Київ: Київський національний університет імені Тараса Шевченка. https://geo.knu.ua/wp-content/uploads/2024/09/2024-materials-of-the-international-scientific-and-practical-conference_min.pdf
36. Овчарук, В. А., Гопченко, Є. Д., & Траскова, А. В. (2017). Нормування характеристик максимального стоку весняного водопілля в басейні Дністра (252 с.). Харків: ФОП Панов А. М.
37. Гопченко, Є. Д. (2013). Побудова залежностей між витратами та рівнями води р. Дністер… Звіт НДР №0114U001751. Одеса: ОДЕКУ.
38. Гопченко, Є. Д., Лобода, Н. С., & Овчарук, В. А. (2014). Гідрологічні розрахунки: підручник (484 с.). Одеса: ТЕС.
39. ОДЕКУ (2011). Оцінка водообміну в системі «русло–заплава–лиман» … (Звіт НДР, 202 с.). Одеса.
40. Tuchkovenko, Y., Loboda, N., & Ovcharuk, V. (2024). Key aspects of seawater intrusion in the Dniester River during storm surges. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (61), 272–287. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-22
41. Михайлов, В. Н. (2004). Гидрология дельты Дуная (449 с.). ГЕОС.
42. Шакірзанова, Ж. Р., & Романова, Є. О. (2021). Водний і сольовий режим озера Катлабух (336 с.). Одеса: ОДЕКУ.
43. Romanova, Y., Shakirzanova, Z., Ovcharuk, V., Todorova, O., Medvedieva, I., & Ivanchenko, A. (2019). Temporal variation of water discharges in the lower course of the Danube River across the area from Reni to Izmail under the influence of natural and anthropogenic factors. Energetika, 65(2–3), 144–160.

Modern runoff of the major rivers of Ukraine into the Northwestern part of the Black Sea

Valeriya Ovcharuk
DSc (Geography), Professor, Head of the Department of Land Hydrology,
Odessa National I. I. Mechnikov University, Odessa, Ukraine

ABSTRACT

Introduction. Understanding the current water discharge of major Ukrainian rivers flowing into the Black Sea is essential for modelling hydrological and oceanographic conditions in its north-western part. Freshwater inflow has a strong influence on thermohaline structure, salinity gradients, circulation, and ecosystem functioning. Under climate

change and increasing anthropogenic pressure, river runoff in southern Ukraine has undergone significant alterations, resulting in prolonged low-flow phases. This study assesses long-term and recent trends in water discharge in the lower reaches of the Dnieper, Southern Bug, Dniester, and Danube rivers - the main freshwater sources for the Black Sea coastal zone -and provides input data for a Climate-Smart Decision Support System (CSDS), contributing to SDG 6 (Clean Water and Sanitation) and SDG 13 (Climate Action).

Methods. The analysis is based on long-term hydrological records (1981–2021) and operational data up to 2024 obtained from the Hydrological Information Laboratory of Odessa I.I. Mechnikov National University and the Ukrainian Hydrometeorological Centre. Hydrological-genetic analysis of runoff time series, statistical trend evaluation, residual mass curves, and comparison of characteristic hydrological years (wet, normal, dry) were applied. For rivers with limited observations in the lower reaches, correlations between upstream discharge and downstream water levels were used to reconstruct typical intra-annual runoff patterns.

Results. All four rivers show a pronounced shift toward persistent low-flow conditions during the past decade. The Southern Bug has experienced a sharp discharge decrease since 2010, reaching less than one-third of the long-term mean by 2024. The Dnieper exhibits alternating wet and dry phases over the last 40 years; however, the 2010s–early 2020s are marked by the lowest runoff values, particularly in 2015 and 2020. The Dniester exhibits relatively regular phase alternation; however, a sustained low-flow period has persisted since 2013–2014. In the Danube delta, discharge variability remains cyclic, yet the period 2016–2024 is characterized by consistently reduced water volumes. Typical intra-annual runoff distributions for wet, normal, and dry years reveal decreased spring peaks and increased warm-season variability.

Conclusions. Major rivers supplying freshwater to the Black Sea coastal zone are currently in a prolonged low-flow phase, which must be considered in hydrodynamic and thermohaline modelling. These trends should be incorporated into numerical oceanographic models (e.g., D-Flow FM) when defining boundary conditions. Under present climatic conditions, dry-year runoff distributions are recommended, while wet-year scenarios should be applied for extreme events. The results provide a basis for CSDS development, supporting adaptive water management and informed decision-making in a climate context.

Keywords*: river runoff, low-flow phase, hydrological regime, Dnieper, Southern Bug, Dniester, Danube, Black Sea, freshwater inflow, modelling, SDG 6, SDG 13.*

References

1. *Sryberko, A. V., Andrianova, O. R., & Tuchkovenko, Y. S. (2024). Thermohaline structure and methods of calculating its spatial distribution in the active layer of the Black Sea [Monograph]. Odessa State Environmental University.http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/13054/ [in Ukrainian]*
2. *Tuchkovenko, Y. S., & Kushnir, D. V. (2024). Modeling the distribution of transformed waters of the Dnipro River in the Black Sea as a result of an artificial flood caused by the destruction of the Kakhovka Reservoir dam. Prospects for Hydroecological Research in the Context of Local and Global Consequences of Warfare: Proceedings of the 9th Congress of the Hydroecological Society of Ukraine (174–176). Dnipro: DNU. [in Ukrainian]*
3. *Tuchkovenko, Y. S., & Kushnir, D. V. (2024). Diagnosis and forecast of oceanographic conditions in the Black Sea. In Proceedings of the 79th Scientific Conference of ONU (10–13). ONU. http://liber.onu.edu.ua/pdf/79_Conf_2024_FH&E.pdf [in Ukrainian]*
4. *Wikipedia contributors. (n.d.). The Northwestern part of the Black Sea. Wikipedia. https://surl.lt/puxsbi [in Ukrainian]*
5. *Blöschl, G., et al. (2017). Changing climate shifts timing of European floods. Science, 357(6351), 588–590. https://doi.org/10.1126/science.aan2506*
6. *Blöschl, G., et al. (2019). Changing climate both increases and decreases European river floods. Nature, 573, 108–111. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6*
7. *Bertola, M., Blöschl, G., Bohac, M., et al. (2023). Megafloods in Europe can be anticipated from observations in hydrologically similar catchments. Nature Geoscience, 16, 982–988. https://doi.org/10.1038/s41561-023-01300-5*
8. *Loboda, N. S. (2015). Modeling the impact of climate change on river runoff characteristics in Ukraine. In Climate change and its impact on the economy of Ukraine (451–482). TES. [in Ukrainian]*
9. *Vyshnevskyi, V. I. (2000). Rivers and water bodies of Ukraine. Kyiv. [in Ukrainian]*
10. *Vyshnevskyi, V. I., & Kosovets, O. O. (2003). Hydrological characteristics of Ukrainian rivers. Kyiv. [in Ukrainian]*
11. *Grebin, V. V. (2010). Modern water regime of rivers of Ukraine. Kyiv. https://geo.knu.ua/wp-content/uploads/2021/03/10_n_lit_gidrol.pdf.pdf [in Ukrainian]*
12. *Gopchenko, Y. D., & Loboda, N. S. (2001). Assessment of natural water resources of Ukraine by the water–heat balance method. Scientific Works of UkrNDGMI, 249, 106–119. [in Ukrainian]*
13. *Loboda, N. S., & Kozlov, M. O. (2020). Assessment of Ukraine's river water resources under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios for 2021–2050. Ukrainian Hydrometeorological Journal, 25, 93–104. https://doi.org/10.31481/uhmj.25.2020.09 [in Ukrainian]*
14. *Loboda, N. S., Tuchkovenko, Y. S., Kozlov, M. O., & Katynska, I. V. (2021). Assessment of river water inflow into the Sasyk estuary-reservoir. Journal of Geology, Geography and Geoecology, 30(2), 315–325. https://doi.org/10.15421/112128*
15. *Lukianets, O. I., et al. (2021). Spatial patterns of changes in mean annual runoff in Ukraine. Ukrainian Geographical Journal, 1(113), 6–14. https://doi.org/10.15407/ugz2021.01.006 [in Ukrainian]*
16. *Ovcharuk, V. A., & Shakirzanova, Z. R. (Eds.). (2024). Extreme hydrological phenomena in Southern Ukraine: Calculations and forecasts. Odessa State Environmental University. http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/13144/ [in Ukrainian]*
17. *Didovets, I., et al. (2020). Climate change impact on water availability of main river basins in Ukraine. Journal of Hydrology: Regional Studies, 32, 100761. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100761*

18. Snizhko, S., Bertola, M., Ovcharuk, V., Shevchenko, O., Didovets, I., & Blöschl, G. (2023). Climate impact on flood changes: An Austrian–Ukrainian comparison. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 71(3), 271–282. https://doi.org/10.2478/johh-2023-0017
19. Obodovskyi, O. H., et al. (2019). Mean annual river runoff in the river basin districts of Ukraine. Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology, 3(54), 65–66. [in Ukrainian]
20. Grebin, V. V., & Lukianets, O. I. (2019). Mean annual runoff of the Dniester basin. In Rivers and Estuaries of the Black Sea Region Conference (46–48). Odesa. [in Ukrainian]
21. Obodovsky, A., Lukyanets, O., Moskalenko, S., Kornienko, V. (2020). Generalization of the average annual water runoff of the rivers according to the hydrographic zoning of Ukraine. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (51), 158-170. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2019-51-11 [in Ukrainian]
22. Ovcharuk, V., Gopchenko, Y., Kichuk, N., Shakirzanova, Z., Kushchenko, L., & Myroschnichenko, M. (2020). Extreme hydrological phenomena in Southern Ukraine. Proceedings of IAHS, 383, 229–235. https://doi.org/10.5194/piahs-383-229-2020
23. Kushchenko, L. V., et al. (2021). Minimum and ecological flow of rivers in Southern Ukraine. Ecological Sciences, 2(35), 30–36. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.2-35.5 [in Ukrainian]
24. Ovcharuk, V., & Gopchenko, Y. (2022). Engineering substantiation of hydrological calculations. In Ecological significance of river ecosystems (351–382). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85045-2.00018-2
25. Loboda, N. S., & Rozvod, M. R. (2025). Assessment of vertical zonality changes of annual runoff. Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology, 3(77), 20–32. [in Ukrainian]
26. Shakirzanova, Z. R., Ovcharuk, V. A., Dokus, A. O., Kushchenko, L. V., & Tymko, O. S. (2022). Probabilistic method for determining low-flow discharge. Visnyk of V. N. Karazin Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology, Geography, Ecology, (57), 251–267. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-19 [in Ukrainian]
27. Shakirzanova, Z. R., & Blaha, A. O. (2025). Forecast of river water availability during water scarcity in Southern Ukraine. In Climate Change Conference Proceedings (97–100). https://doi.org/10.32782/19092025 [in Ukrainian]
28. State Water Cadastre. (2017). River basin districts of the Dnipro basin: Long-term hydrological data (2016–2020). [in Ukrainian]
29. Afanasiev, S., et al. (2025). River Basin Management Plan of the Southern Bug (2025–2030). https://davr.gov.ua/fls18/PURB_PivdennyiBuh.pdf [in Ukrainian]
30. Vyshnevskyi, V. I., & Kutsyi, A. V. (2022). Long-term changes in the water regime of rivers of Ukraine. K., Naukova Dumka. [in Ukrainian]
31. Khilchevskyi, V. K., et al. (2009). Water resources and water quality of the Southern Bug basin. Nika-Tsentr. [in Ukrainian]
32. Ovcharuk, V. A. (2020). Maximum spring flood runoff of lowland rivers of Ukraine. Helvetyka. [in Ukrainian]
33. European Parliament. (2006). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of water policy. [in Ukrainian]
34. Grebin, V. V., et al. (2013). Hydrographic zoning methods of Ukraine. Interpres. [in Ukrainian]
35. Tuchkovenko, Y., Kushnir, D., & Ovcharuk, V. (2024). Modeling the distribution of transformed waters of the Dnipro River in the Black Sea following the artificial flood caused by the Kakhovka dam destruction. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Natural and Geographical Studies of Relief, Climate, and Surface Waters: Current State and Development Prospects" (October 2–4, Kyiv, Ukraine), 54. Kyiv: Taras Shevchenko National University of Kyiv. https://geo.knu.ua/wp-content/uploads/2024/09/2024-materials-of-the-international-scientific-and-practical-conference_min.pdf
36. Ovcharuk, V. A., Gopchenko, Ye. D., & Traskova, A. V. (2017). Standardization of characteristics of maximum spring flood runoff in the Dniester River basin, 252. Kharkiv: FOP Panov A. M. [in Ukrainian]
37. Gopchenko, Y. D. (2013). Dependence between water levels and discharges of the Dniester. Research Report No. 0114U001751. ODEKU. [in Ukrainian]
38. Gopchenko, Y. D., Loboda, N. S., & Ovcharuk, V. A. (2014). Hydrological calculations. TES. [in Ukrainian]
39. ODEKU. (2011). Assessment of water exchange in the channel–floodplain–liman system. Research report. [in Ukrainian]
40. TuchkovenkoY., Loboda, N., & Ovcharuk, V. (2024). Key aspects of seawater intrusion in the Dniester River during storm surges. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (61), 272-287. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-22
41. Mikhaylov, V. N. (2004). Hydrology of the Danube Delta. M., GEOS.
42. Shakirzanova, Z. R., & Romanova, Y. O. (2021). Water and salt regime of Lake Katlabukh. ODEKU. [in Ukrainian]
43. Romanova, Y., Shakirzanova, Z., Ovcharuk, V., Todorova, O., Medvedieva, I., & Ivanchenko, A. (2019). Temporal variation of water discharges in the lower course of the Danube River across the area from Reni to Izmail under the influence of natural and anthropogenic factors. Energetika, 65(2–3), 144–160.

Received 10 September 2025
Accepted 28 October 2025

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-25
УДК 528.8:910.3

Надійшла 7 квітня 2025 р.
Прийнята 18 травня 2025 р.

Стан вкритих деревною рослинністю територій Кремінської громади Луганської області під час війни: супутниковий аналіз

Сергій Остапчук [1]
к. тех. н., доцент, кафедра геодезії та картографії,
[1] Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне, Україна,
e-mail: s.m.ostapchuk@nuwm.edu.ua, https://orcid.org/0000-0002-4493-1144;
Оксана Остапчук [1]
к. тех. н., доцент, кафедра комп'ютерних наук та прикладної математики,
e-mail: o.p.ostapchuk@nuwm.edu.ua, https://orcid.org/0000-0003-4774-3605;
Павло Більчук [1]
магістр, кафедра геодезії та картографії,
e-mail: 2025geo@ukr.net, https://orcid.org/0009-0006-7895-3575

Внаслідок російської військової агресії довкілля зазнає великих руйнувань, серед яких одними з найбільш масштабних є втрати деревної рослинності. Вкриті деревною рослинністю території (ліси, посадки, сади, парки та ін.) мають маскувальні властивості, тому зазнають постійних знищень і пошкоджень внаслідок обстрілів, пожеж, замінувань, руху військової техніки, будівництва фортифікаційних споруд та ін. Для моніторингу та ідентифікації втрат деревної рослинності на території найбільш залісненої у Луганській області Кремінської територіальної громади, де впродовж довгого часу відбувалися і наразі проходять бойові дії, використано безкоштовні супутникові знімки Sentinel-2 2019-2024 рр. та програмне забезпечення QGIS. За розглянутою методикою із використанням індексу вологості *NDMI* створено відповідні растрові зображення, які містили тільки пікселі, що відносилися до дерев: здорових, сухих та пошкоджених. На основі отриманих матеріалів знайдено площі деревовкритих територій Кремінської громади для вказаних 3 класів дерев станом на червень-липень кожного року із зазначеного періоду моніторингу. На представлених зображеннях усі ділянки із здоровими, сухими та пошкодженими деревами добре ідентифікуються. Встановлено, що впродовж 2019-2024 рр. загальна площа деревовкритих територій громади зменшилася з 30359,5 га до 28636,8 га. Особливо важкі втрати виявлено з початку повномасштабної російської військової агресії: загальна площа вкритих деревною рослинністю територій зменшилася на 1886,5 га. При цьому площа територій із здоровими деревами скоротилася на 6932,5 га, площа із пошкодженими деревами збільшилася на 6792,4 га, а площа із сухими зменшилася на 1747,1 га за рахунок масштабних пожеж, які там відбувалися. Зазначено, що розглянута методика дозволяє оперативно встановлювати стан вкритих деревною рослинністю територій і створювати плани по їх відновленню. Виконані дослідження можуть бути корисними для органів влади різних рівнів, територіальних громад, окремих відомств, підприємств, установ, на землях яких відбувалися чи наразі проходять бойові дії під час російсько-української війни.

***Ключові слова**: моніторинг, деревна рослинність, бойові дії, супутникові знімки, індекси, класифікація зображень, площа, Кремінська громада.*

Як цитувати: Остапчук Сергій, Остапчук Оксана, Більчук Павло (2025). Стан вкритих деревною рослинністю територій Кремінської громади Луганської області під час війни: супутниковий аналіз. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*, (63), 332-348. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-25

In cites: Ostapchuk Serhii, Ostapchuk Oksana, Bilchuk Pavlo (2025). The state of tree-covered territories of Kreminna community in Luhansk region during the war: satellite analysis. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 332-348. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-25 [in Ukrainian]

Постановка проблеми. Загальновідомо, що деревна рослинність є невід'ємною складовою екосистеми і її пошкодження чи втрата несе за собою відповідні негативні наслідки (розвиток ерозії ґрунтів, посух, піщаних бур, деградація ландшафтів, втрата цінних біоценозів, погіршення стану атмосферного повітря, здоров'я людей та ін.).

Наразі дана тематика особливо актуальною є для території України, насамперед для минулих і теперішніх зон бойового зіткнення з російськими агресорами, де деревна рослинність (ліси, посадки, сади та ін.) зазнала і зазнає великих втрат. Вкриті деревною рослинністю території мають природні маскувальні властивості, тому опинилися під активним прямим чи опосередкованим впливом бойових дій: авіаційних бомбардувань, ракетних, артилерійських та мінометних обстрілів, прильотів БПЛА, обстрілів зі стрілецької зброї, руху важкої бойової техніки, мінування, вирубування деревини з метою створення позицій, обігріву тощо. Виникаючі в таких умовах ризики призвели до зрозумілого припинення будь-яких лісогосподарських, лісокультурних, природоохоронних та інших заходів у цих небезпечних районах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Різноманітні питання, пов'язані із дослідженнями впливу військових дій на довкілля є складним і масштабним завданням, тому їх вивченню присвячена чимала кількість наукових публікацій з аналізом відповідних ситуацій та методологій

© Остапчук Сергій, Остапчук Оксана, Більчук Павло, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

оцінювання [1-9].

На основі аналізу, узагальнення та систематизації різного роду інформації науковцями наголошується, що військові дії спричиняють цілу низку негативних факторів, які завдають шкоди лісовим екосистемам через вибухи, пожежі, будівництво фортифікаційних споруд, переміщення важкої техніки, забруднення її уламками, різного роду боєприпасами, побутовими відходами та ін. Вплив російсько-української війни на ліси є багатогранним, і спеціалістам ще належить дати оцінку всіх його аспектів, підрахувати обсяг завданої шкоди для подальших робіт по їх відновленню [10, 11].

На основі наявних матеріалів 2014-2022 рр. щодо забруднення лісів тимчасово окупованої території України вибухонебезпечними предметами, а також замінованих ділянок лісів вздовж лінії розмежування, здійснено аналітичний огляд досвіду картографування лісів у зонах бойових дій та оцінки їх пошкоджень за даними ДЗЗ, пропонуються загально-методичні підходи до розв'язання цієї проблеми. Наводяться пропозиції стосовно трансформації ведення лісового господарства та рекомендації з удосконалення його нормативно-правого регулювання. Зазначено, що представлені матеріали корисні для органів виконавчої влади різних рівнів, територіальних громад, передусім з метою підвищення безпеки місцевого населення, а також для менеджерів лісової галузі з метою прийняття належних управлінських рішень [12].

Виконуються дослідження по вивченню зміни характеристик ґрунтового покриву лісових масивів, які зазнали впливу військових дій (на прикладі 15 пожеж на території Бехівського лісництва Коростенського лісомисливського господарства у Житомирській області). Зафіксовано підвищений рівень pH до нижніх горизонтів на мікропідвищеннях (7,55) та мікропониженнях (7,35), збільшення вмісту органічного вуглецю у верхньому гумусовому горизонті (0,42% на мікропідвищеннях і 0,46% на мікропониженнях). Наведені результати можуть бути використані для розробки відповідних екологічних програм з метою відновлення пошкоджених пожежами лісів [13].

Проведена оцінка викидів вуглецю, спричинена внаслідок військової російської агресії ландшафтними пожежами в Україні. Для виявлення пожеж застосовано технологію моніторингу лісових пожеж OroraTech, межі охоплених вогнем ділянок визначено за допомогою відповідних часових рядів супутникових знімків Sentinel-2, для розподілу горілих площ використано карту Copernicus Dynamic Land Cover. Самі викиди вуглецю було розраховано за даними інтенсивності ландшафтних пожеж (dNBR) та частки спаленої біомаси. Сумарні викиди CO_2 становили 5,20 млн т, інших парникових газів – 0,28 млн т. Це перше відоме детальне картографування ландшафтних пожеж в Україні упродовж 2022 р. з виконаним аналізом кожного полігону [14].

Проаналізовано токсичний вплив пожеж, які відбулися в результаті повномасштабного вторгнення окупаційних військ в Україну, на екосистеми та життєдіяльність населення. Особливо наголошується на несприятливій дії на людський організм продуктів горіння рослинного біоматеріалу лісів [15].

У публікаціях зазначається, що для виконання досліджень можна використовувати оптичні спектральні, лідарні, радарні зображення. Широке визнання отримало використання оптичних зображень з розрахунком спектральних індексів, як цінних інструментів для ідентифікації об'єктів та покращення їх видимості на цифрових зображеннях ДЗЗ [16, 17]. Дослідження здійснюють з використанням багатозональних супутникових даних Landsat-8, 9, Sentinel-2, 3. Через неможливість виконання додаткових польових досліджень для уточнення даних щодо площ верхових лісових пожеж використовують лідарний сканер. Так, за період з березня по квітень 2022 р. у межах Київського Полісся зафіксовано збільшення частки верхових лісових пожеж до 9,5% від загальної площі пожеж [18]. Відомі дослідження із застосуванням супутникових радарних зображень високого розрізнення з метою моніторингу лісових насаджень. При цьому кількісну характеристику рослинності отримано за допомогою розрахунку індексу NDVI [19].

Виконується обґрунтування вибору даних ДЗЗ для моніторингу стану деревної рослинності [12]. При цьому звертається увага, що використання даних знімання в оптичному діапазоні, окрім своїх переваг в ідентифікації рослинності, містить недоліки стосовно ефективності в умовах хмарності чи пожеж. Радарні системи володіють потенційними перевагами для визначення структурних змін лісового покриву. Але доступність до найбільш ефективних сенсорів, що працюють в L-діапазоні (довжина хвилі 15-20 см) є обмеженою. Технологія лідарного знімання, враховуючи її вартість, обмежене покриття та недоступність для районів бойових дій, наразі в Україні є недоцільною.

Досвід управління лісами у країнах Азії, Африки, Європи, Північної та Південної Америки, де у різні роки відбувалися війни і збройні конфлікти, також висвітлено у численних публікаціях. Зазначено, що прямими чинниками нега-

тивного впливу на ліси та інші природні екосистеми є бомбардування, умисні підпали, мінування, наявність нерозірваних боєприпасів, що призводить до забруднення довкілля, знищення наявних ресурсів тощо [20-23].

Наочними ілюстраціями безпосереднього впливу бойових дій на ліси є їх випалювання з метою знищення позицій супротивника. Так, під час Першої світової війни з метою очищення схованок місцевих бійців опору турецька армія знищувала вогнем лісовкриті території в горах Родопи в Болгарії, а під час Другої світової війни практикувалися підпали внутрішніх лісів ворогуючої сторони з метою відволікання його уваги від військових операцій [24]. Більш свіжими прикладами подібних дій стали випалювання та вирубування лісів з метою знищення сховищ повстанців у Туреччині, Республіці Конго [25-27].

Під час збройних конфліктів між Афганістаном і Пакистаном, Ізраїлем і Ліваном, у Грузії внаслідок авіанальотів і ракетних атак виникали численні лісові пожежі [24, 28].

Опосередкований вплив військових дій на ліси може бути викликаний і вимушеним переселенням мирних мешканців через збільшення обсягів використання лісових ресурсів. Наприклад, активне використання лісу вимушеними переселенцями в якості палива та прихистку відзначено у Боснії і Герцеговині, Судані, Руанді, Конго, Нікарагуа, Колумбії [26-30].

Досить нагальною є проблема наземних мін та вибухонебезпечних предметів (авіаційних бомб, ракет, артилерійських снарядів, ручних гранат та ін.) у теперішніх та колишніх зонах бойових дій. Це викликає відповідну міжнародну увагу, в тому числі й ООН. Згідно з наведеними оцінками, у різних країнах світу наразі нараховується понад 110 млн активних мін і їх кількість щорічно зростає. Найбільш забрудненими у цьому відношенні країнами є Ангола, Єгипет, Іран, Ірак, Афганістан, Китай, Камбоджа, Боснія і Герцеговина, Хорватія, Україна [12, 24, 31-34]. Зазначається, що у В'єтнамі вибухонебезпечні предмети, які залишилися внаслідок війни 1959-1975 рр., навіть через 50 років становлять загрозу і продовжують викликати лісові пожежі. А у Північній Македонії впродовж пожежонебезпечного сезону 2007 р. зафіксовано більше 70 випадків вибухів боєприпасів Першої світової війни (1914-1918 рр.), спричинених лісовими пожежами.

Як свідчить світовий досвід, війни і збройні конфлікти однозначно мають негативний вплив на стан вкритих деревною рослинністю територій. Зважаючи на масштабність і тривалість військових дій (2014-2025 рр.), дане питання для території України набуває особливої гостроти.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. На основі наведеного вище очевидною виглядає необхідність розробки і впровадження цілісного та системного підходу до постійного моніторингу шкоди від бойових дій вкритим деревною рослинністю територіям за даними дистанційного зондування Землі.

Матеріали дистанційних знімань, на відміну від наземних, дозволяють регулярно, оперативно і безпечно виконувати обстеження зазначених територій включно й з тими, які знаходяться у зоні бойових дій чи під контролем окупантів, визначати масштаби пошкоджених і знищених площ, що може стати необхідною основою для створення планів по їх відновленню у майбутньому. Адже після звільнення тимчасово окупованих земель потрібно буде приступати до тривалого і важкого процесу регенерації площ з деревною рослинністю з метою збереження цих цінних екосистем.

Метою досліджень є проведення моніторингу та ідентифікація стану вкритих деревною рослинністю територій Кремінської територіальної громади Луганської області внаслідок збройної агресії РФ за даними супутникових знімань.

Кремінська громада для досліджень вибрана невипадково, оскільки у загальній площі земель (52,85 тис. га) ліси та інші лісовкриті площі є важливим екологічним та економічним ресурсом і становлять близько 58% її території. Це є найвищим показником серед усіх територіальних громад Луганської області. Саме на території цієї громади впродовж тривалого часу відбувалися і проходять наразі одні з найбільш активних бойових дій.

Матеріал і методи досліджень. Для моніторингу деревовкритих площ використано супутникову місію Sentinel-2. Матеріали дистанційних знімань цього сузір'я є безкоштовними, одними з найпоширеніших джерел інформації і заслужено витребувані різними споживачами. Вибір знімків здійснено з дотриманням параметрів хмарності (до 10%), атмосферної та геометричної корекції (Level-2A). У нашому випадку вони забезпечують необхідне розрізнення знімків (10-20 м), а це дозволяє виконувати моніторинг вкритих деревною рослинністю територій, виявляти знищені і пошкоджені ділянки, оцінювати масштаб змін, визначати навіть поодинокі дерева. Знімки вирішено вибрати за 2019-2024 рр. в період червня-липня, коли рослинність перебуває в активній фазі вегетації. Такий підхід видається коректним і логічним, оскільки забезпечує і рівні інтервали в часових проміжках, і охоплює 3 роки до повномасштабного російського вторгнення та 3 роки після.

В узагальненому вигляді порядок методики

виконання досліджень можна подати як:

- Завантаження:
  - завантаження векторних даних;
  - завантаження супутникових знімків.
- Підготовка:
  - обрізання знімків за межею цільової області;
  - створення кольорових композитів;
  - розрахунок вегетаційних індексів.
- Класифікація:
  - неконтрольована класифікація;
  - контрольована класифікація.
- Моніторинг:
  - порівняння класифікаційних зображень;
  - фільтрація кластерів та виконання просторової вибірки;
  - аналіз змін.

На першому етапі потрібно завантажити векторні дані, щоб мати змогу у подальшому швидко завантажувати супутникові знімки для виконання подальшої роботи. Завантаження знімків виконано з платформи Copernicus Open Access Hub.

Перейшовши на другий етап, необхідно виконати обрізання усіх завантажених супутникових знімків за межею інтересу. Це дає можливість і зменшити обсяг пам'яті, і пришвидшити подальшу обробку знімків. Після цього слід створити кольорові композити, що дозволить виконувати аналіз земного покриву, класифікувати необхідні об'єкти, відстежувати здійснені зміни. Важливим компонентом для коректної класифікації є розрахунок вегетаційних індексів. Якраз вегетаційні індекси $NDVI$ (нормалізований диференційований вегетаційний індекс), що вимірює щільність зеленої маси рослинності, $NDMI$ (нормалізований різницевий індекс вологості), що визначає вміст вологості в рослинному покриві та NBR (нормалізований індекс вигорання), що виділяє вигорілі ділянки у зоні пожежі, є одними з найпоширеніших і можуть якісно виконувати цю процедуру.

У ході третього етапу потрібно виконати неконтрольовану класифікацію з метою визначення кількості класів, які будуть використані у подальшій контрольованій класифікації знімків. Неконтрольовану класифікацію можна реалізовувати за допомогою алгоритму K-Means (кластеризації k-середніх). За її результатами створюється вибірка для виконання уже контрольованої класифікації, щоб мати можливість коректно класифікувати об'єкти на знімку.

Важливою складовою останнього етапу є порівняння класифікаційних зображень. Воно виконується шляхом віднімання таких зображень. Це дозволяє здійснювати моніторинг деревовкритих територій й визначати площі знищених, сухих та здорових дерев.

Опрацювання знімків проводилося з використанням програми QGIS. Основним інструментом опрацювання супутникових знімків був плагін напівавтоматичної класифікації SCP (Semi-Automatic Classification Plugin).

Застосування розглянутої методики значно полегшує виявлення та моніторинг стану вкритих деревною рослинністю площ на тимчасово окупованих територіях і дозволить оперативно побудувати стратегію їх відновлення.

Виклад основного матеріалу. Для виконання досліджень були взяті супутникові знімки за 03.07.2019, 27.06.2020, 27.07.2021, 07.07.2022, 27.07.2023, 11.06.2024.

Після виконання обрізання за ними були розраховані індекси $NDVI$, $NDMI$ та NBR. Такий підхід зумовлений тим, що слід підібрати саме той індекс чи індекси, які найкраще відображатимуть ситуацію на знімку, тобто даватимуть змогу ідентифікувати ділянки із здоровими, сухими та пошкодженими деревами. Для цього використано спектральні канали: видимий червоний (для розділення різновидів рослин, при цьому враховується поглинання хлорофілу), ближній інфрачервоний (для визначення кількості вегетаційної біомаси), короткохвильовий інфрачервоний (для визначення вмісту води в рослинності).

Індекс $NDVI$ обчислено за формулою:

$$NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED),$$

де NIR – відображення у ближньому інфрачервоному діапазоні спектру (для Sentinel-2 – це канал B8); RED – відображення у червоному діапазоні спектру (для Sentinel-2 – це канал B4).

Індекс $NDMI$ знайдено як:

$$NDMI = (NIR - SWIR1)/(NIR + SWIR1),$$

де NIR – відображення у ближньому інфрачервоному діапазоні спектру (для Sentinel-2 – це канал B8); $SWIR1$ – відображення у короткохвильовому інфрачервоному діапазоні спектру (для Sentinel-2 – це канал B11).

Індекс NBR розраховано за формулою:

$$NBR = (NIR - SWIR2)/(NIR + SWIR2),$$

де NIR – відображення у ближньому інфрачервоному діапазоні спектру (для Sentinel-2 – це канал B8); $SWIR2$ – відображення у короткохвильовому інфрачервоному діапазоні спектру (для Sentinel-2 – це канал B12).

Розрахунки індексів $NDVI$, $NDMI$ та NBR виконувалися в програмі QGIS у калькуляторі растрів. Їх розподіл представлено відповідно на рис. 1, 2 і 3.

При пошкоджені деревної рослинності вона різко втрачає вологу і в'яне, при цьому може

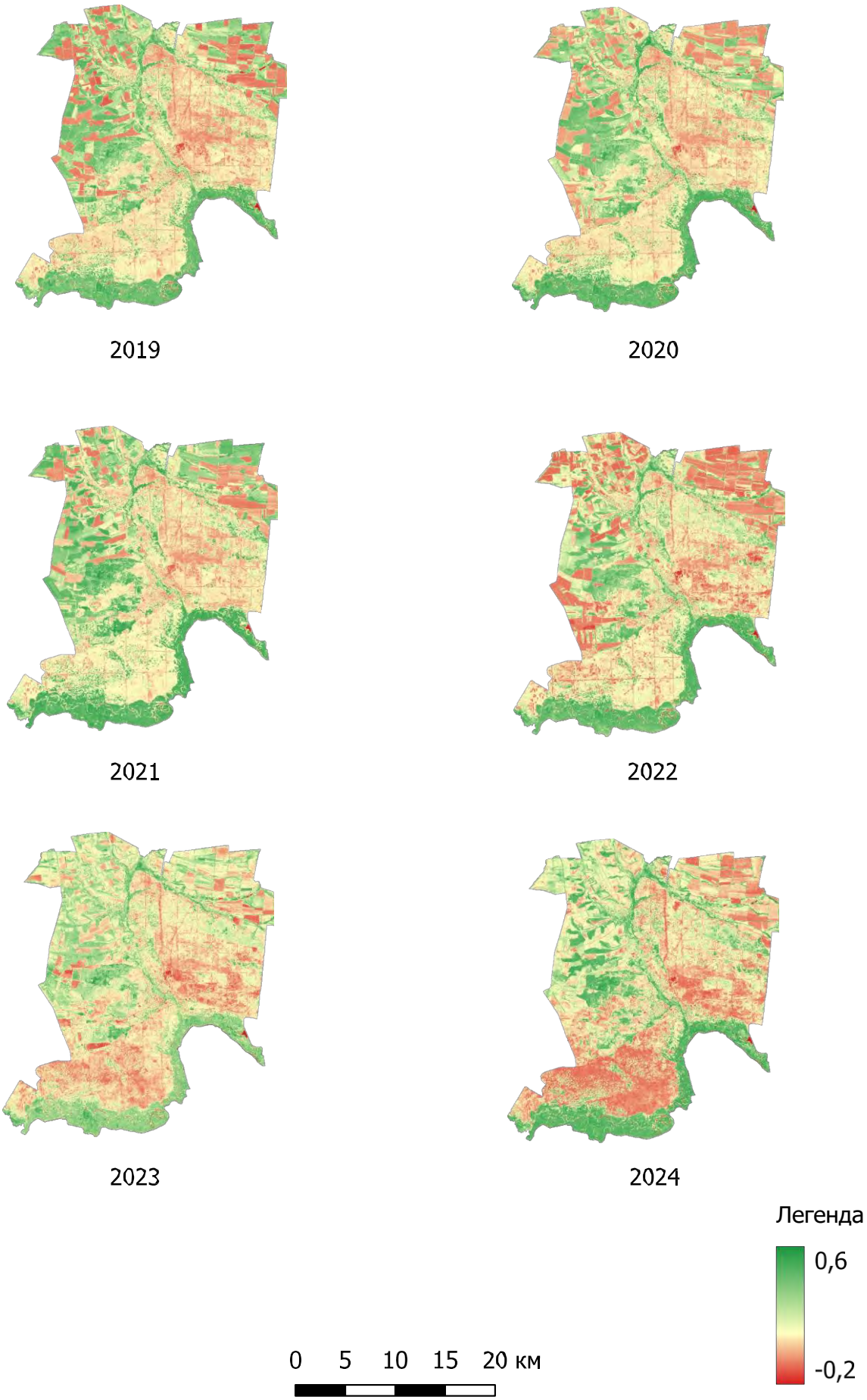


Рис. 1. Розподіл індексу *NDVI* 2019-2024 рр. / Fig. 1. Distribution of the *NDVI* index in 2019-2024

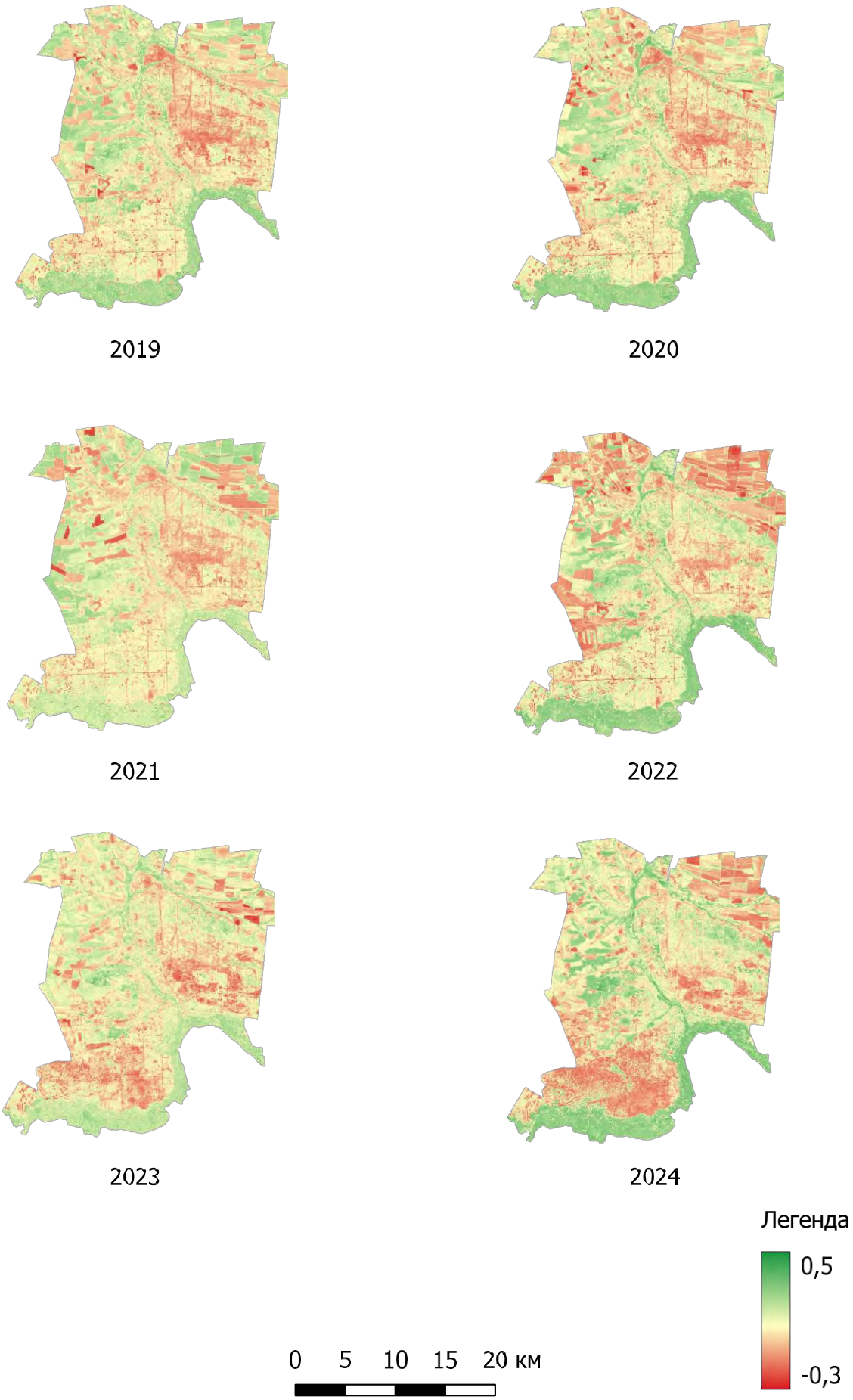


Рис. 2. Розподіл індексу *NDMI* 2019-2024 рр. / Fig. 2. Distribution of the *NDMI* index in 2019-2024

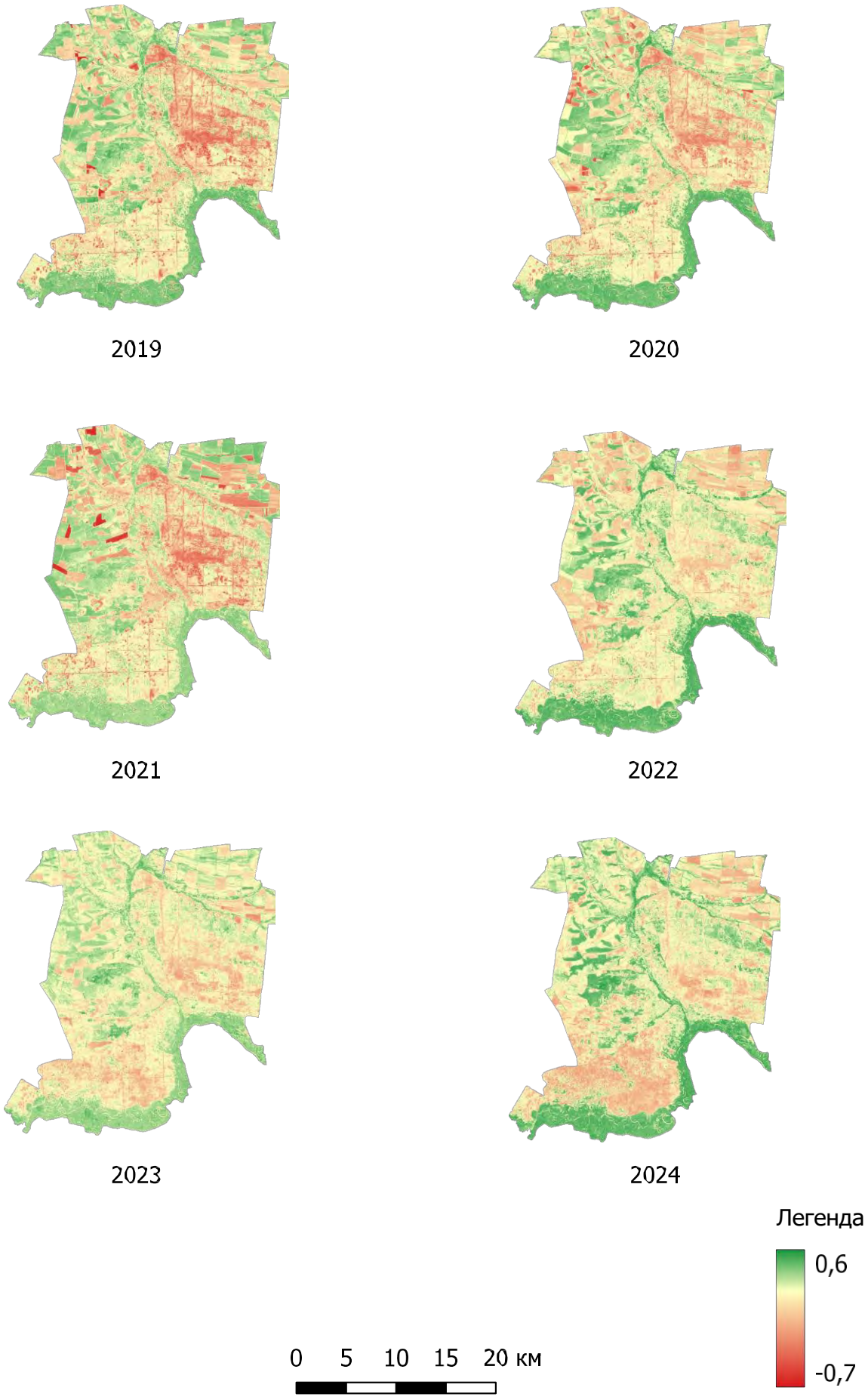


Рис. 3. Розподіл індексу *NBR* 2019-2024 рр. / Fig. 3. Distribution of the *NBR* index in 2019-2024

відбуватися їх повна загибель. Аналізуючи результати розрахунку індексів, для подальшої роботи вирішено використати індекс *NDMI*, тому що він найкраще розділяє ділянки з трав'яною рослинністю, здорові, сухі та пошкоджені дерева.

Як і більшість індексів, *NDMI* має значення від -1 до +1. Про водний стрес свідчать значення, що наближаються до -1, тоді як близькі до +1 вказують на ознаки заболочування. Кожне проміжне значення відображає дещо інший стан рослинності, а саме:

- -1,0 – -0,8 (рослинний покрив відсутній);
- -0,8 – -0,6 (рослинний покрив майже відсутній);
- -0,6 – -0,4 (дуже низька щільність рослинного покриву);
- -0,4 – -0,2 (низька щільність рослинного покриву, волога відсутня або майже відсутня);
- -0,2 – 0,0 (густота рослинного покриву нижче середнього, присутній водний стрес);
- 0,0 – +0,2 (густота рослинного покриву середня, спостерігається водний стрес);
- +0,2 – +0,4 (густота рослинного покриву вище середнього, спостерігається незначний водний стрес);
- +0,4 – +0,6 (густота рослинного покриву висока, водний стрес не спостерігається);
- +0,6 – +0,8 (густота рослинного покриву дуже висока, водний стрес відсутній);
- +0,8 – +1,0 (густий рослинний покрив повністю вкриває територію, водний стрес відсутній).

Важливе місце у дослідженнях відіграє класифікація. Саме вона на основі обумовлених характеристик дозволяє розділити усі об'єкти на окремі категорії. У представленій роботі її завдання полягає у ідентифікації територій з деревами серед інших елементів місцевості, таких як споруди, гідрографія, дорожня мережа, сільськогосподарські угіддя та ін. Поставлене завдання виконано за алгоритмами неконтрольованої і контрольованої класифікацій із використанням плагіна SCP програми QGIS. Класифікаційні алгоритми основані на тому, що кожному об'єкту притаманні характерні особливості відбиття в різних частинах електромагнітного спектру. Багатоканальні знімки фіксують такі особливості, тому їх доцільно використовувати для ідентифікації об'єктів.

Для проведення неконтрольованої класифікації з метою визначення приблизної кількості класів на знімку використано відомий алгоритм кластеризації K-Means, який дає змогу автоматично групувати дані у природні кластери. При цьому об'єкти будуть віднесені до кластеру тоді, коли знаходитимуться на мінімальній відстані від його центру.

Неконтрольовану класифікацію виконано для знімка 2019 р., при цьому було задано різну кількість класів (від 5 до 20). Визначено, що орієнтовна чисельність класів на знімку має бути близько 10. Приклад порівняння різної кількості класів за алгоритмом K-Means наведено на рис. 4 і 5.

При виконанні контрольованої класифікації користувачу доводиться встановлювати класи об'єктів вручну, виходячи з їх візуального аналізу чи інших доступних даних. За такого підходу можна задавати чіткі межі для кожного класу, що дає змогу забезпечувати високий рівень точності.

У тестовому режимі контрольовану класифікацію виконано також для знімка 2019 р. Після створення класів навчальної вибірки і бібліотеки спектральних сигнатур з використанням методу «Minimum distance» було отримано результуюче зображення контрольованої класифікації, на якому виділено 9 класів.

Оскільки проведений аналіз виявив на певних лісових площах некоректну класифікацію (пошкоджений і сухий ліс згрупувалися в один клас), то для усунення даної проблеми було використано накладання знімка з розподілом індексу вологості *NDMI* на знімок у видимому діапазоні. Були визначені мінімальні та максимальні значення спектрів у даній групі пікселів, що дало змогу встановити відповідні діапазони:

- для здорових дерев від +0,09 до +0,50;
- для сухих дерев від -0,01 до +0,09;
- для пошкоджених дерев від -0,04 до -0,01.

В результаті подальшої роботи виявлено також, що частина полів та лугів з трав'яною рослинністю була віднесена до класу здорових дерев (значення пікселів потрапили в діапазон виділених значень для класифікації здорових дерев). Для виправлення ситуації було створено шари маски з попередньо завантажених векторних даних (траплялося, дооцифрованих в ручному режимі) та задати усім пікселям, що знаходяться у межах маски, значення NO DATA. До створеної маски було також додано векторні шари споруд, дорожньої мережі та гідрографії. Унаслідок таких дій здорові дерева були ідентифіковані коректно.

У ході виконання подальших процедур, які включали перекласифікацію і об'єднання усіх трьох растрів з деревами, задання кольорової палітри, були отримані наведені на рис. 6 і 7 зображення.

Показані у легендах класи 1, 2 і 8 відповідають за деревовкриті території:

- 1 клас виділяє пікселі, які відносяться до площ із здоровими деревами;

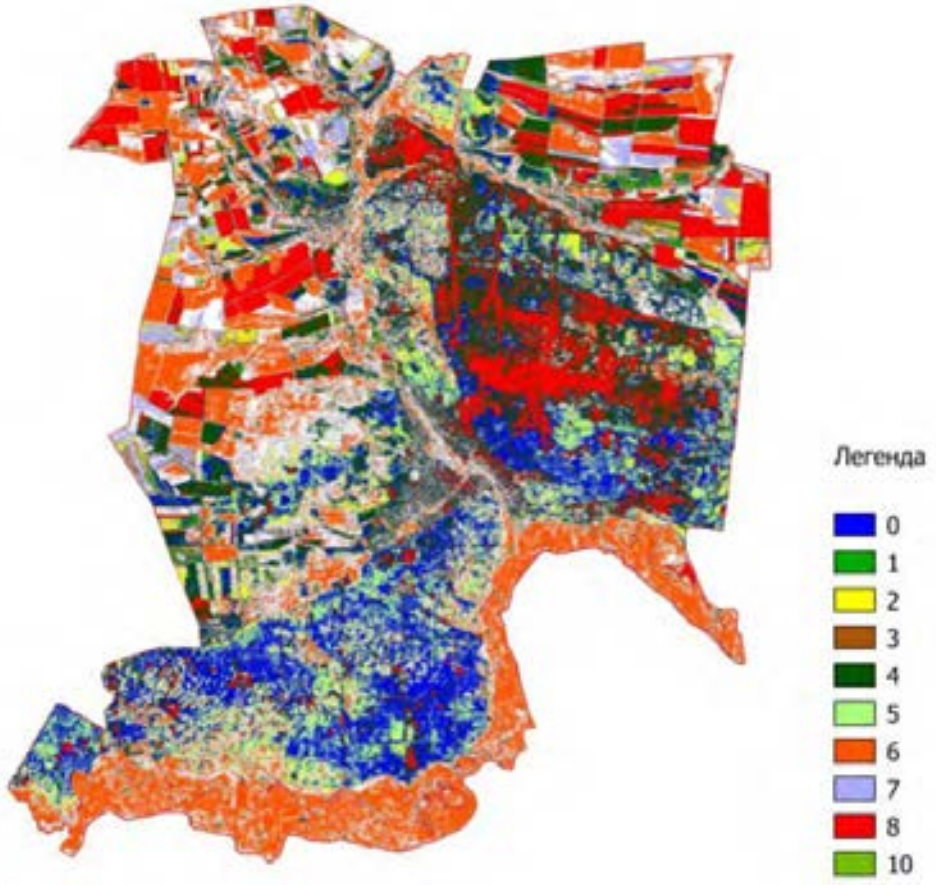


Рис. 4. Неконтрольована класифікація для знімка 2019 р. (11 класів) /
Fig. 4. Unsupervised classification for the 2019 image (11 classes)

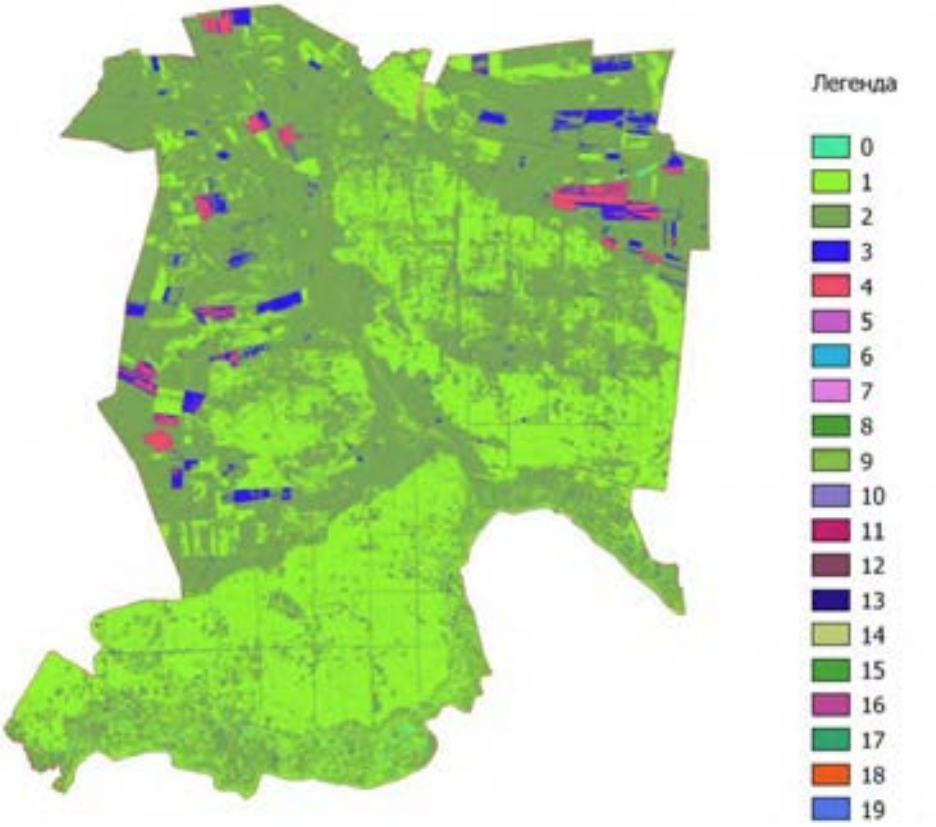


Рис. 5. Неконтрольована класифікація для знімка 2019 р. (20 класів) /
Fig. 5. Unsupervised classification for the 2019 image (20 classes)

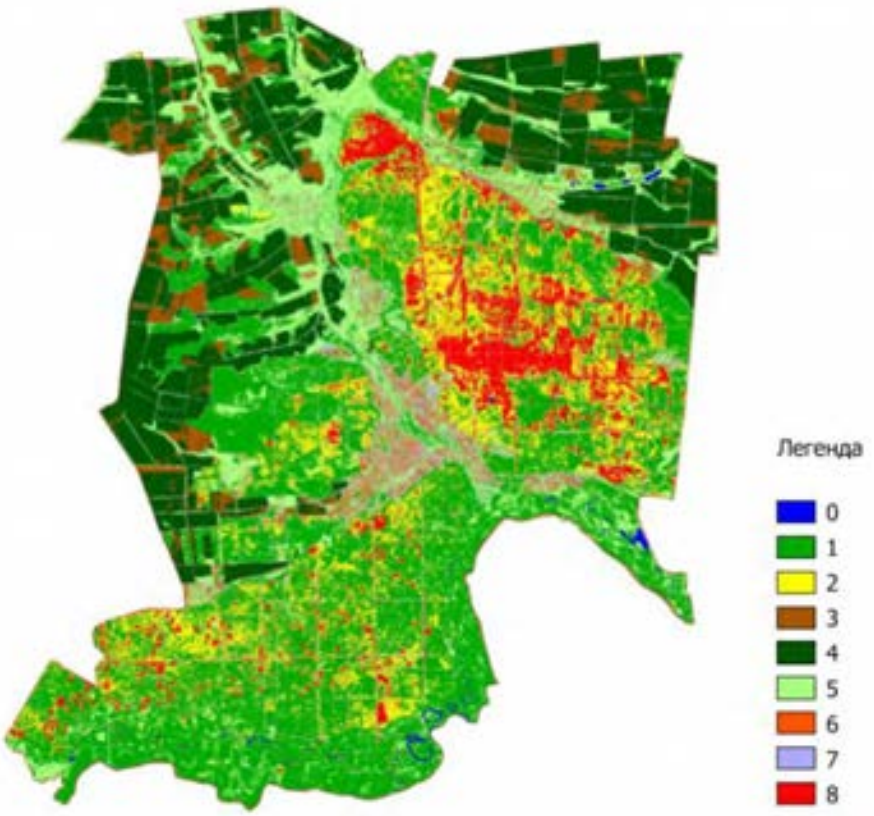


Рис. 6. Контрольована класифікація для знімка 2019 р. (9 класів) /
Fig. 6. Supervised classification for the 2019 image (9 classes)

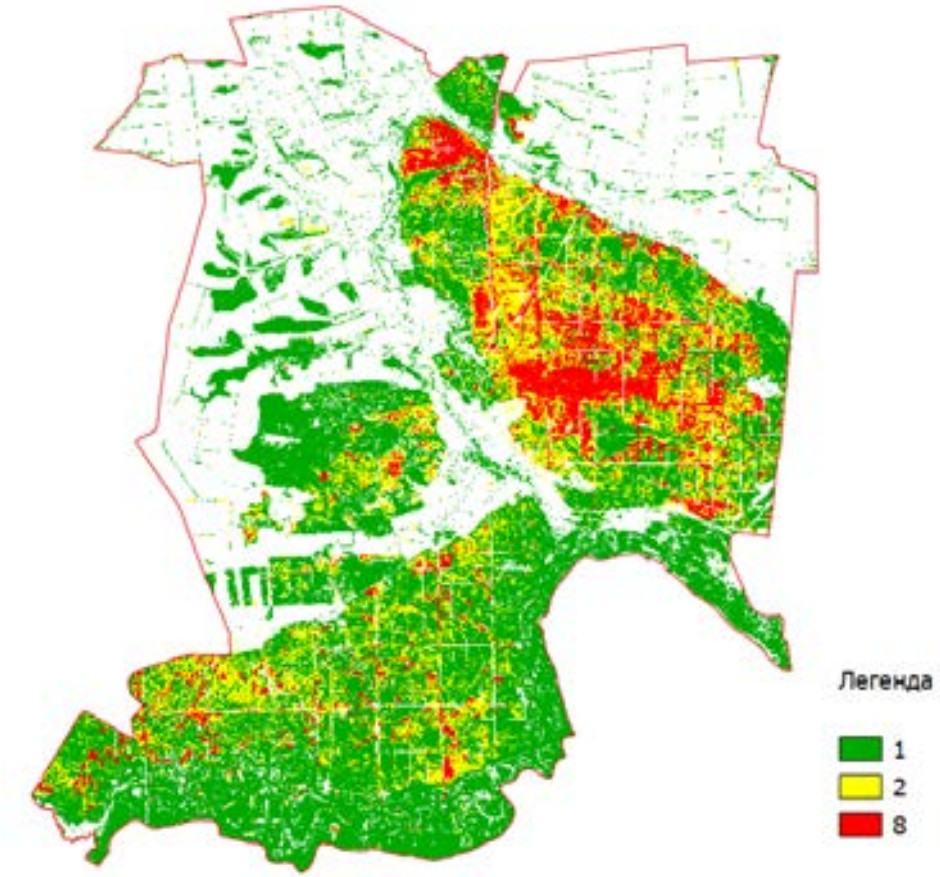


Рис. 7. Контрольована класифікація для знімка 2019 р. (3 класи дерев) /
Fig. 7. Supervised classification for the 2019 image (3 classes of trees)

- 2 клас включає пікселі, які ідентифікують ділянки сухих дерев;
- 8 клас охоплює пікселі, які зображають пошкоджені деревовкриті площі.

Зазначений алгоритм було використано для роботи з усіма іншими супутниковими знімками. Це дало можливість створити відповідні растрові зображення, на яких знаходяться тільки пікселі, що відносяться до вказаного класу дерев (рис. 8).

Отримані матеріали шляхом векторизації дали змогу розрахувати площі усіх 3 класів деревовкритих територій, що відповідним чином відображають табл. 1 і 2 та рис. 9 і 10.

Проведений аналіз засвідчує значне погір-

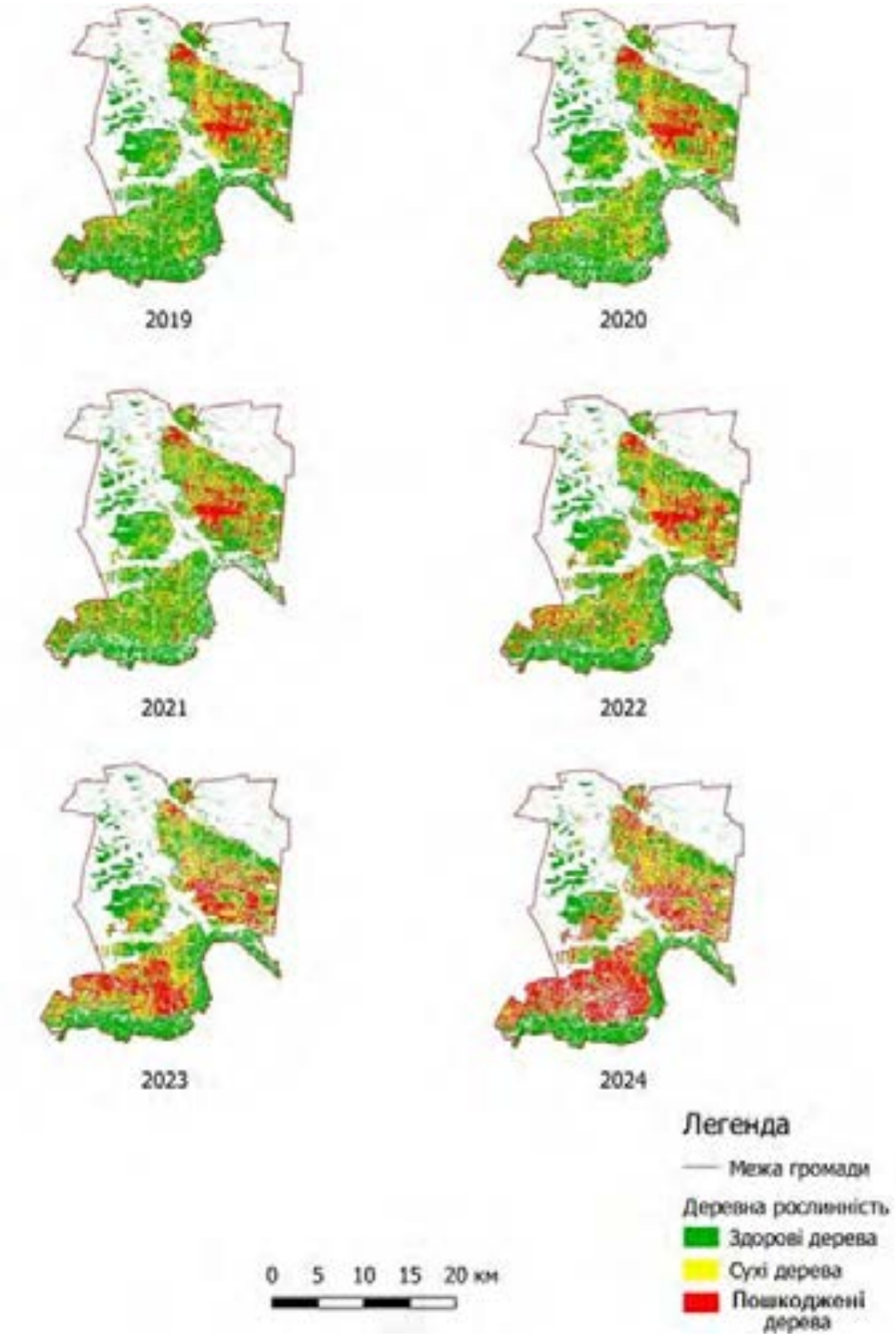


Рис. 8. Моніторинг вкритої деревною рослинністю території 2019-2024 рр. /
Fig. 8. Monitoring of the area covered with woody vegetation in 2019-2024

Таблиця 1 / Table 1

Площі деревовкритих територій Кремінської громади /
Areas of tree-covered territories in Kreminna community

Рік	Площа територій із здоровими деревами		Площа територій із сухими деревами		Площа територій з пошкодженими деревами		Загальна площа деревовкритих територій, га
	га	%	га	%	га	%	
2019	19780,9	65,2	6918,0	22,8	3660,7	12,1	30359,5
2020	18681,4	61,4	7513,4	24,7	4252,0	14,0	30446,8
2021	18885,5	61,9	7900,0	25,9	3738,0	12,2	30523,3
2022	16755,4	55,0	8432,0	27,7	5280,1	17,3	30467,5
2023	14610,9	49,7	7676,8	26,1	7116,8	24,2	29404,5
2024	11952,9	41,7	6152,8	21,5	10531,1	36,8	28636,8

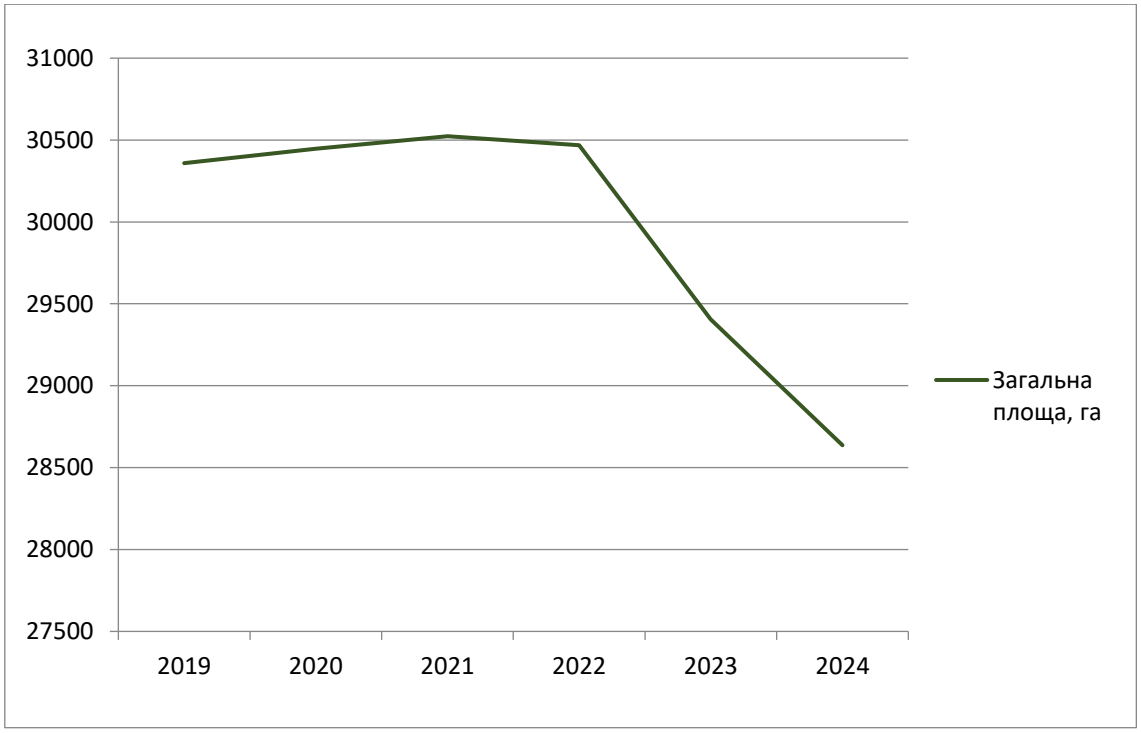


Рис. 9. Динаміка загальної площі деревовкритих територій /
Fig. 9. Dynamics of the total area of tree-covered areas

шення стану вкритих деревною рослинністю територій Кремінської територіальної громади впродовж 2019-2024 рр. Загальна площа таких територій зменшилася з 30359,5 га до 28636,8 га. При цьому площа територій із здоровими деревами зменшилася з 19780,9 га (65,2% від загальної деревовкритої площі) до 11952,9 га (41,7% від загальної деревовкритої площі), площа із сухими деревами скоротилася з 6918,0 га (22,8% від загальної деревовкритої площі) до 6152,8 га (21,5% від загальної деревовкритої площі), а площа із пошкодженими збільшилася з 3660,7 га (12,1% від загальної деревовкритої площі) до 10531,1 га (36,8% від загальної деревовкритої площі).

Якщо брати до уваги 2019-2021 рр., то за цей проміжок загальна площа деревовкритих територій незначно, але все ж, збільшилася на 163,7 га. Але при цьому площа здорових дерев зменшилася на 895,5 га, а площа сухих і пошкоджених збільшилася відповідно на 982,0 га і 77,3 га.

Особливо великі втрати спостерігаються з початку повномасштабного вторгнення РФ: за час ведення бойових дій площа деревного покриву скоротилася загалом на 1886,5 га. Дуже гнітюче виглядають й інші дані: площа територій із здоровими деревами зменшилася на 6932,5 га, площа територій із пошкодженими збільшилася на 6792,4 га. Площа територій із сухими деревами скоротилася на 1747,1 га за рахунок масштабних пожеж, які там відбувалися.

Висновки. Розглянута методика на основі використання безкоштовних супутникових знімків Sentinel-2 та програмного забезпечення QGIS дозволяє надійно, оперативно і безпечно встановлювати стан вкритих деревною рослинністю

Таблиця 2 / Table 2

Зміна площ деревовкритих територій Кремінської громади /
Change in the area of tree-covered territories in Kreminna community

Рік	Площа територій із здоровими деревами		Площа територій із сухими деревами		Площа територій з пошкодженими деревами		Загальна площа деревовкритих територій	
	га	різниця, га	га	різниця, га	га	різниця, га	га	різниця, га
2019	19780,9		6918,0		3660,7		30359,5	
		-1099,4		+595,4		+591,3		+87,2
2020	18681,4		7513,4		4252,0		30446,8	
		+203,9		+386,6		-514,0		+76,5
2021	18885,3		7900,0		3738,0		30523,3	
		-2129,9		+532,0		+1542,1		-55,8
2022	16755,4		8432,0		5280,1		30467,5	
		-2144,6		-755,1		+1836,6		-1063,0
2023	14610,9		7676,8		7116,8		29404,5	
		-2658,0		-1524,0		+3414,3		-767,7
2024	11952,9		6152,8		19531,1		28636,8	

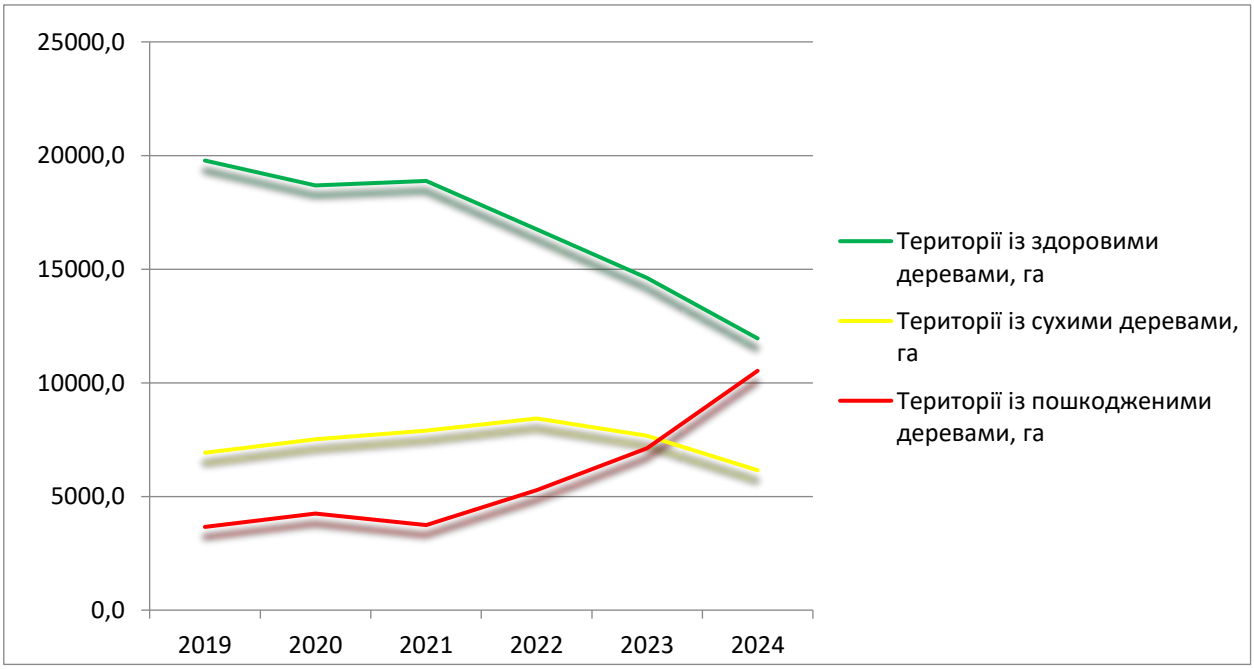


Рис. 10. Динаміка площі деревовкритих територій за класами /
Fig. 10. Dynamics of the area of tree-covered areas by class

територій. Такі території можуть мати практично будь-які площі і знаходитися навіть у зонах безпосередніх бойових дій, що наразі є актуально для України. На основі отриманих матеріалів високого просторового розрізнення знайдено площі деревовкритих територій Кремінської громади для різних класів дерев станом на червень-липень кожного року періоду 2019-2024 рр. На представлених зображеннях усі ділянки із здоровими, сухими та пошкодженими деревами добре ідентифікуються, їх розміщення і площа є чіткими та зрозумілими.

Встановлено масштабні втрати деревної рослинності з початку повномасштабної російської військової агресії, наведено конкретні цифри по деревовкритій території загалом і по кожному з 3 виділених класів дерев.

Виконані дослідження є необхідною основою для розробки стратегії і створення планів по відновленню знищеної і пошкодженої деревної рослинності. Вони можуть бути корисними для органів влади різних рівнів, територіальних громад, окремих відомств, підприємств, установ, на землях яких відбувалися чи наразі проходять бойові дії.

У перспективі і при виконанні певних умов розглянуті у дослідженні матеріали можуть доповнюватися даними радарного та лідарного знімання. Такий комплексний підхід дозволить поглибити моніторинг стану деревної рослинності.

Список використаних джерел

1. *Балюк, С. А., Кучер, А. В., Солоха, М. О., & Соловей, В. Б. (2024). Оцінювання впливу збройної агресії РФ на ґрунтовий покрив України. Український географічний журнал, 1. 7-18. https://doi.org/10.15407/ugz2024.01.007*
2. *Гаврилюк, Р., Шпак, О., Логвиненко, О., & Запольський, І. (2024). Методичні аспекти оцінки стану забруднення геологічного середовища нафтопродуктами, спричиненого військовою агресією РФ проти України. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», (61). 23-38. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-02*
3. *Дідух, Я. П., Маруняк, Є. О., Лісовський, С. А., Куземко, А. А., & Чехній, В. М. (2024). Методологічні аспекти типізації впливів на довкілля, спричинених російською агресією в Україні. Український географічний журнал, 2. 3-12. https://doi.org/10.15407/ugz2024.02.003*
4. *Єлістратова, Л. О., Апостолов, О. А., Ходоровський, А. Я., Хижняк, А. В., Томченко, О. В., & Лялько, В. І. (2022). Використання супутникової інформації для оцінки соціоекономічних наслідків від війни в Україні. Український географічний журнал, 2. 11-18. https://doi.org/10.15407/ugz2022.02.011*
5. *Kozlova, A., Lischenko, L., Andreiev, A., Lubskyi, M., & Lysenko, A. (2024). Water Occurrence Mapping of Kakhovka Reservoir after the Dam Destruction. International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2024», Lviv, October 2024. 1-5.*
6. *Крайнюк, О., Буц, Ю., Барбашин, В., Нікітченко, О., & Сухов, В. (2024). Деградація екосистем у Харківській області під час війни: супутниковий аналіз. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», (61). 329-343. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-26*
7. *Макаренко, Н. А., Строкаль, В. П., Бережняк, Є. М., Бондарь, В. І., Павлюк, С. Д., Вагалюк, Л. В., Наумовська, О. І., Ладика, М. М., & Ковпак, А. В. (2022). Вплив російської воєнної агресії на природні ресурси України: аналіз ситуації, методологія оцінювання. Наукові доповіді НУБіП України, 4(98). https://doi.org/dopovidi2022.04.003*
8. *Сніжко, С., Запотоцький, С., Шевченко, О., Олексієнко, І., Дідовець, Ю., & Бронстерт, А. (2023). Вплив руйнування Каховського водосховища на водні ресурси півдня України. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка, серія «Географія», 1/2 (86/87). 7-16. https://doi.org/10.17721/1728-2721.2023.86.1*
9. *Trofymchuk, O., Vishnyakov, V., Sheviakina, N., Klymenko, V., & Zahorodnia, S. (2023). Detection of surface soil disturbance areas as a result of military actions in Ukraine by remote sensing methods. SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference EXPO Proceedings, 23(2.1). https://doi.org/10.5593/sgem2023/2.1/s08.20*
10. *Нагорна, Н. В. (2023). Вплив воєнних дій на природоохоронні території Донецької області. Фізична географія та геоморфологія, 46(1). 47-53. https://doi.org/10.17721/phgg.2023.1-6.05*
11. *Пацев, І. С., Барабаш, О. В., & Пацева, І. Г. (2023). Вплив воєнних дій на лісові екосистеми Житомирщини. Науково-практичний журнал «Екологічні науки», 5(50). 114-118. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.5-50.16*
12. *Зібцев, С. В., Сошенський, О. М., Голдаммер, Й. Г., Миронюк, В. В., Борсук, О. А., Гуменюк, В. В., Мєшкова, В. Л., Василюк, О. В., & Букша, І. Ф. (2022). Лісоуправління на територіях, забруднених вибухонебезпечними предметами. WWF Україна. 148.*
13. *Мороз, В. (2024). Аналіз та прогнозування масштабів та наслідків впливу лісових пожеж на екосистеми України. Український журнал лісівництва та деревинознавства, 15(3). 43-60. https://doi.org/10.31548/forest/3.2024.43*
14. *Зібцев, С., Пастернак, В., Василишин, Р., Миронюк, В., Сидоренко, С., & Сошенський, О. (2024). Оцінка викидів вуглецю від ландшафтних пожеж в Україні за період війни у 2022 році. Український журнал лісівництва та деревинознавства, 15(1). 126-139. https://doi.org/10.31548/forest/1.2024.126*
15. *Буц, Ю. В., Крайнюк, О. В., Сенчихін, Ю. М., Барбашин, В. В., & Трішина, О. О. (2023). Вплив небезпечних токсичних факторів пожеж при військових діях на екосистеми і життєдіяльність населення. Науково-технічний збірник «Комунальне господарство міст», серія «Технічні науки та архітектура», 5, 180. 196-202. https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-6-180-196-201*
16. *Дорош, Й. М., Ібатуллін, Ш. І., & Дорош, О. С. (2023). Застосування геоінформаційних технологій при визначенні площ підтоплених земель унаслідок руйнування дамби Каховської ГЕС. Землеустрій, кадастр і моніторинг земель, 3. 98-109. http://dx.doi.org/10.31548/zemleustriy2023.03.09*
17. *Ліщенко, Л. П., & Філіпович, В. Є. (2024). Оперативний супутниковий геомоніторинг наслідків руйнування греблі Каховської гідроелектростанції. Український журнал дистанційного зондування Землі, 11(1). 21-31. https://doi.org/10.36023/ujrs.2024.11.1.257*

18. Klymenko, K., & Nazarova, O. (2024). Assessment of the Occurrence and Spread of Fires Caused by Hostilities in the Ecosystems of Kyiv Polissia based on the Data of Remote Sensing of the Earth. International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2024», Lviv, October 2024. 1-5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510032
19. Кавац, О. О., Гнатушенко, В. В., Кібукевич, Ю. О., & Кавац, Ю. В. (2018). Комп'ютерний аналіз радарних зображень високої роздільної здатності з метою моніторингу лісових насаджень. Вісник ХНТУ, 3(66), 1. 260-264.
20. Gilmour, D. A., San, N. V., & Tsechalicha, X. (2000). Rehabilitation of degraded forest ecosystems in Cambodia, Lao PDR, Thailand and Vietnam. An overview, WWF. 72.
21. Heiderscheidt, D. (2018). The Impact of World War one on the Forests and Soils of Europe. The Undergraduate Research Journal at the University of Northern Colorado, 7(3), 3. https://digscholarship.unco.edu/urj/vol7/iss3/3
22. Mendez, F., & Valánszki, I. (2021). Environmental Armed Conflict Assessment Using Satellite Imagery. Journal of Environmental Geography, 13. 1-14.
23. West, A. J. (2003). Forests and National Security: British and American Forestry Policy in the Wake of World War I. Environmental History, 8(2). 270-293. https://doi.org/10.2307/3985712
24. Goldammer, J. G. (2013). Beyond Climate Change: Wildland Fires and Human Security in Cultural Landscapes in Transition – Examples from Temperate-Boreal Eurasia. Vegetation Fires and Global Change – Challenges for Concerted International Action A White Paper directed to the United Nations and International Organizations. 285-311.
25. Dudley, J. P., Ginsberg, J. R., Plumptre, A. J., Hart, J. A., & Campos, L. C. (2002). Effects of War and Civil Strife on Wildlife and Wildlife Habitats. Conservation Biology, 16(2). 319-329. https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2002.0030
26. Hanson, T. (2018). Biodiversity conservation and armed conflict: a warfare ecology perspective. Annals of the New York Academy of Sciences. https://doi.org/10.1111/nyas.13689
27. Van Etten, J., Jongerden, J., de Vos, H. J., Klaasse, A., & van Hoeve, E. C. E. (2008). Environmental destruction as a counterinsurgency strategy in the Kurdistan region of Turkey. Geoforum, 39(5). 1786-1797. https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2008.05.001
28. Butsic, V., Baumann, M., Shortland A., Walker S., & Kuemmerle, T. (2015). Conservation and conflict in the Democratic Republic of Congo: The impacts of warfare, mining, and protected areas on deforestation. Biological Conservation, 191. 266-273. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.06.037
29. United Nations Environment Programme, 2007. Sudan Post-Conflict Environmental Assessment. Nairobi: UNEP. https://postconflict.unep.ch/publications/UNEP_Sudan.pdf
30. Vanegas-Cubillos, M., Sylvester, J., Villarino, E., P´erez-Marulanda, L., Ganzenmüller, R., L¨ohr, K., Bonatt, M., & Castro-Nunez, A. (2022). Forest cover changes and public policy: A literature review for post-conflict Colombia. Land Use Policy. 114. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.105981
31. Borkowski, P. (2019). Land mines threaten people and seriously impact sustainable forest management in Europe. The European State Forest Association (EUSTAFOR). https://eustafor.eu/land-mines-threaten-people-and- seriously-impact-sustainable-forest-management-in-europe/
32. Guidelines for the creation and implementation of infrastructure concepts for preventive forest fire protection and the use of authorities and organizations with security tasks (BOS) on areas suspected of or contaminated with explosive ordnance (2020). Bundesanstalt für Immobilienaufgaben (BImA), Bundesforst.
33. Musa, S., Šiljković, Ž., & Šakić, D. (2017). Geographical reflections of mine pollution in Bosnia and Herzegovina and Croatia. Journal for Geography, 12(2). 53-70. https://doi.org/10.18690/rg.12.2.3994
34. Prem, M., Purroy, M. E., & Vargas, J. F. (2021). Landmines: the local effects of demining. Documentos de Trabajo 019588, Universidad del Rosario. https://ideas.repec.org/cgi-bin/refs.cgi

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу
Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

The state of tree-covered territories of Kreminna community in Luhansk region during the war: satellite analysis

Serhii Ostapchuk [1]
PhD (Technical), Associate Professor, Department of Geodesy and Cartography,
[1] National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine;
Oksana Ostapchuk [1]
PhD (Technical), Associate Professor,
Department of Computer Science and Applied Mathematics;
Pavlo Bilchuk [1]
MSc, Department of Geodesy and Cartography

ABSTRACT

Problem statement. As a result of Russia's military aggression, the environment is suffering extensive damage, among which the loss of woody vegetation is one of the most significant. Areas covered with woody vegetation (forests, plantations, gardens, parks, etc.) have camouflage properties, so they are constantly destroyed and damaged by shelling, fires, mines, military vehicles, construction of fortifications, etc.

Analysis of the latest research and publications. Various issues related to the study of the environmental impact of military operations are a complex and large-scale task, so a considerable number of scientific publications with analysis of relevant situations and assessment methodologies are devoted to their study.

The purpose of the research is to monitor and identify the loss of woody vegetation on the territory of the most forested Kreminna territorial community in Luhansk Oblast, where hostilities have been taking place for a long time and are currently taking place.

Material and methods of research. Free Sentinel-2 satellite images and QGIS software were used in the research. It was decided to select the images for 2019-2024 in the period of June-July, when the vegetation is in the active vegetation phase. This approach seems correct and logical, as it provides equal time intervals and covers 3 years before the full-scale Russian invasion and 3 years after. In a generalized form, the procedure of the research methodology can be presented as follows: downloading vector data and satellite images; image preparation; image classification; monitoring the state of woody vegetation.

Results. According to the methodology described above, using the NDMI moisture index, the corresponding raster images were created, which contained only pixels related to trees: healthy, dry, and damaged. Based on the obtained materials, the areas of tree-covered areas of the Kreminna community for the 3 classes of trees were found. All areas with healthy, dry, and damaged trees are clearly identified on the images. It was found that during 2019-2024, the total area of tree-covered territories of the community decreased from 30359.5 hectares to 28636.8 hectares. Particularly severe losses have been detected since the beginning of full-scale Russian military aggression: the total area of tree-covered territories decreased by 1886.5 hectares. At the same time, the area of territories with healthy trees decreased by 6932.5 hectares, the area with damaged trees increased by 6792.4 hectares, and the area with dry trees decreased by 1747.1 hectares due to large-scale fires that occurred there.

Scientific novelty and practical significance. The proposed model for determining the state of woody vegetation in the conditions of full-scale Russian military aggression was first implemented for the territory of the Kreminna territorial community. The surveys conducted allow us to quickly determine the condition of areas covered with woody vegetation and create plans for their restoration. In this regard, they can be useful for authorities at various levels, territorial communities, individual departments, enterprises, and institutions on whose lands hostilities took place or are currently taking place during the Russian-Ukrainian war.

Keywords*: monitoring, woody vegetation, hostilities, satellite images, indices, image classification, area, Kreminna community.*

References

1. *Balyuk S.A., Kucher A.V., Solokha M.O., Solovey V.B. (2024). Assessment of the impact of the armed aggression of the Russian Federation on the soil cover of Ukraine. Ukrainian Geographical Journal. 1. 7-18. DOI: https://doi.org/10.15407/ugz2024.01.007 [in Ukrainian]*
2. *Gavryliuk R., Shpak O., Logvinenko O., Zapolsky I. (2024). Methodological aspects of assessing the state of pollution of the geological environment by oil products caused by the military aggression of the Russian Federation against Ukraine. Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology". 61. 23-38. DOI: https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-02 [in Ukrainian]*
3. *Didukh Y.P., Marunyak E.O., Lisovsky S.A., Kuzemko A.A., Chekhniy V.M. (2024). Methodological aspects of typification of environmental impacts caused by Russian aggression in Ukraine. Ukrainian Geographical Journal. 2. 3-12. DOI: https://doi.org/10.15407/ugz2024.02.003 [in Ukrainian]*
4. *Yelistratova L.O., Apostolov O.A., Khodorovskyi A.Y., Khyzhnyak A.V., Tomchenko O.V., Lyal'ko V.I. (2022). Use of satellite information to assess the socio-economic consequences of the war in Ukraine. Ukrainian Geographical Journal. 2. 11-18. DOI: https://doi.org/10.15407/ugz2022.02.011 [in Ukrainian]*
5. *Kozlova A., Lischenko L., Andreiev A., Lubskyi M., Lysenko A. (2024). Water Occurrence Mapping of Kakhovka Reservoir after the Dam Destruction. International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2024», Lviv, October 2024. 1-5.*
6. *Krainiuk O., Buts Y., Barbashyn V., Nikitchenko O., Sukhov V. (2024). Ecosystem degradation in Kharkiv region during the war: satellite analysis. Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology". 61. 329-343. DOI: https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-26 [in Ukrainian]*
7. *Makarenko N.A., Strokal V.P., Berezhniak E.M., Bondar V.I., Pavliuk S.D., Vahaliuk L.V., Naumovska O.I., Ladika M.M., Kovpak A.V. (2022). The impact of Russian military aggression on the natural resources of Ukraine: analysis of the situation, assessment methodology. Scientific Reports of NULES of Ukraine. 4(98). DOI: https://doi.org/dopovidi2022.04.003 [in Ukrainian]*
8. *Snizhko S., Zapotskyi S., Shevchenko O., Oleksienko I., Didovets Y., Bronstert A. (2023). The impact of the destruction of the Kakhovka reservoir on the water resources of southern Ukraine. Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Geography Series. 1/2 (86/87). 7-16. DOI: https://doi.org/10.17721/1728-2721.2023.86.1 [in Ukrainian]*
9. *Trofymchuk O., Vishnyakov V., Sheviakina N., Klymenko V., Zahorodnia S. (2023). Detection of surface soil disturbance areas as a result of military actions in Ukraine by remote sensing methods. SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference EXPO Proceedings. 23(2.1). DOI: https://doi.org/10.5593/sgem2023/2.1/s08.20*
10. *Nagorna N.V. (2023). The impact of military operations on the protected areas of Donetsk region. Physical Geography and Geomorphology. 46(1). 47-53. DOI: https://doi.org/10.17721/phgg.2023.1-6.05 [in Ukrainian]*
11. *Patsev I.S., Barabash O.V., Patseva I.G. (2023). Impact of military operations on forest ecosystems of Zhytomyr region. Scientific and Practical Journal "Ecological Sciences". 5(50). 114-118. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.5-50.16 [in Ukrainian]*

12. Zibtsev S.V., Soshensky O.M., Goldammer J.G., Myroniuk V.V., Borsuk O.A., Humeniuk V.V., Meshkova V.L., Vasilyuk O.V., Buksha I.F. (2022). Forest management in areas contaminated by explosive ordnance. WWF Ukraine. 148. [in Ukrainian]
13. Moroz V. (2024). Analysis and prediction of the scale and consequences of the impact of forest fires on the ecosystems of Ukraine. / Ukrainian Journal of Forestry and Wood Science. 15(3). 43-60. DOI: https://doi.org/10.31548/forest/3.2024.43 [in Ukrainian]
14. Zibtsev S., Pasternak V., Vasylyshyn R., Myroniuk V., Sydorenko S., Soshenskyi O. (2024). Estimation of carbon emissions from landscape fires in Ukraine during the war in 2022. Ukrainian Journal of Forestry and Wood Science. 15(1). 126-139. DOI: https://doi.org/10.31548/forest/1.2024.126 [in Ukrainian]
15. Buts Y.V., Krainiuk O.V., Senchikhin Y.M., Barbashyn V.V., Trishina O.O. (2023). Influence of dangerous toxic factors of fires during military operations on ecosystems and human activity. Scientific and technical collection "Municipal Economy of Cities", series "Technical Sciences and Architecture". 5, 180. 196-202. DOI: https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-6-180-196-201 [in Ukrainian]
16. Dorosh Y.M., Ibatullin Sh.I., Dorosh O.S. (2023). Application of geographic information technologies in determining the areas of flooded lands due to the destruction of the Kakhovka HPP dam. Land Management, Cadastre and Land Monitoring. 3. 98-109. DOI: http://dx.doi.org/10.31548/zemleustriy2023.03.09 [in Ukrainian]
17. Lishchenko L.P., Filipovych V.E. (2024). Operational satellite geomonitoring of the consequences of the destruction of the Kakhovka hydroelectric power plant dam. Ukrainian Journal of Remote Sensing. 11(1). 21-31. DOI: https://doi.org/10.36023/ujrs.2024.11.1.257 [in Ukrainian]
18. Klymenko K., Nazarova O. (2024). Assessment of the Occurrence and Spread of Fires Caused by Hostilities in the Ecosystems of Kyiv Polissia based on the Data of Remote Sensing of the Earth. International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2024». Lviv, October 2024. 1-5. DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510032
19. Kavats O.O., Hnatushenko V.V., Kibukevych Y.O., Kavats Y.V. (2018). Computer analysis of high-resolution radar images for the purpose of monitoring forest plantations. Bulletin of KhNTU. 3 (66), 1. 260-264. [in Ukrainian]
20. Gilmour D.A., San. Tsechalicha X. (2020). Rehabilitation of degraded forest ecosystems in Cambodia, Lao PDR, Thailand and Vietnam. An overview. WWF. 72.
21. Heiderscheidt D. (2018). The Impact of World War one on the Forests and Soils of Europe. The Undergraduate Research Journal at the University of Northern Colorado. 7(3). 3. DOI: https://digscholarship.unco.edu/urj/vol7/iss3/3
22. Mendez F., Valánszki I. (2021). Environmental Armed Conflict Assessment Using Satellite Imagery. Journal of Environmental Geography. 13. 1-14.
23. West A.J. (2003). Forests and National Security: British and American Forestry Policy in the Wake of World War I. Environmental History. 8(2). 270–293. DOI: https://doi.org/10.2307/3985712
24. Goldammer J.G. (2013). Beyond Climate Change: Wildland Fires and Human Security in Cultural Landscapes in Transition – Examples from Temperate-Boreal Eurasia. Vegetation Fires and Global Change – Challenges for Concerted International Action a White Paper directed to the United Nations and International Organizations. 285-311.
25. Dudley J.P., Ginsberg J.R., Plumptre A.J., Hart J.A., Campos L.C. (2002). Effects of War and Civil Strife on Wildlife and Wildlife Habitats. Conservation Biology. 16(2). 319–329. DOI: https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2002.0030
26. Hanson T. (2018). Biodiversity conservation and armed conflict: a warfare ecology perspective. Annals of the New York Academy of Sciences. DOI: https://doi.org/10.1111/nyas.13689
27. Van Etten J., Jongerden J., de Vos H.J., Klaasse A., van Hoeve E.C.E. (2008). Environmental destruction as a counterinsurgency strategy in the Kurdistan region of Turkey. Geoforum. 39(5). 1786–1797. DOI: https://doi.org/10.1016/j. geoforum.2008.05.00
28. Butsic V., Baumann M., Shortland A., Walker S., Kuemmerle T. (2015). Conservation and conflict in the Democratic Republic of Congo: The impacts of warfare, mining, and protected areas on deforestation. 191. 266–273. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.06.037
29. United Nations Environment Programme. (2007). Sudan Post-Conflict Environmental Assessment. Nairobi. UNEP. DOI: https://postconflict.unep.ch/publications/UNEP_Sudan.pdf
30. Vanegas-Cubillos M., Sylvester J., Villarino E., P´erez-Marulanda L., Ganzenmüller R., L¨ohr K., Bonatti M., Castro-Nunez A. (2022). Forest cover changes and public policy: A literature review for post-conflict Colombia. Land Use Policy. 114. DOI: https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.105981
31. Borkowski P. (2019). Land mines threaten people and seriously impact sustainable forest management in Europe. The European State Forest Association (EUSTAFOR). https://eustafor.eu/land-mines-threaten-people-and- seriously-impact-sustainable-forest-management-in-europe/
32. Guidelines for the creation and implementation of infrastructure concepts for preventive forest fire protection and the use of authorities and organizations with security tasks (BOS) on areas suspected of or contaminated with explosive ordnance. (2020). Bundesanstalt für Immobilienaufgaben (BImA). Bundesforst.
33. Musa S., Šakić D., Šiljković Ž. (2017). Geographical reflections of mine pollution in Bosnia and Herzegovina and Croatia. 12-2.
34. Prem M., Purroy M.E., Vargas J.F. (2021). Landmines: the local effects of demining. Documentos de Trabajo 019588. Universidad del Rosario.

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 7 April 2025
Accepted 18 May 2025

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-26
UDC 911.3:314.1(477.87)
Received 11 September 2025
Accepted 23 October 2025

Temporariness vs. Integration of Internally Displaced Persons under Uncertainty: The Case of Border Territorial Communities in Zakarpattia

Nataliia Provotar [1]
PhD (Geography), Associate Professor, Department of Economic and Social Geography,
[1] Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine,
e-mail: provotarnat@ukr.net, https://orcid.org/0000-0003-2211-6509;
Halyna Shchuka [2]
DSc (Pedagogy), Professor, Department of Geography and Tourism,
[2] Ferenc Rakoczi II Transcarpathian Hungarian University, Berehove, Ukraine,
e-mail: halina.shchuka@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-4368-5081;
Kostyantyn Mezentsev [1]
DSc (Geography), Professor, Department of Economic and Social Geography,
e-mail: mezentsev@knu.ua, https://orcid.org/0000-0003-1974-7860

ABSTRACT

Introduction. The integration of internally displaced persons (IDPs) into host communities has become a pressing issue in Ukraine due to ongoing war and large-scale displacement. Understanding the factors that facilitate or hinder integration is critical for designing effective policies and interventions that support IDPs' social, economic, and cultural adaptation. This study examines IDP integration in the border communities of Berehove District, Zakarpattia Region, with a focus on community participation, satisfaction with basic needs, and the role of host community authorities and residents. The main objective is to identify determinants of integration under conditions of uncertainty and temporary displacement.

Methods. The study employed a survey-based approach targeting registered IDPs across several border communities, combined with comparative cross-contextual interpretation. The questionnaire included thematic blocks on demography, self-assessment of satisfaction with key needs (housing, employment, social assistance, education, and health services), migration intentions, evaluation of local authorities' activities, and participation in community life. Participation in community life was used as the primary indicator of integration. The data were analyzed to identify patterns of basic needs satisfaction, barriers to participation, and the influence of local institutional and socio-cultural factors on integration.

Results. Findings show that IDPs vary in their readiness to integrate, depending on employment conditions, satisfaction with basic services, and socio-cultural and institutional contexts of host communities. Employment satisfaction emerged as a key factor facilitating participation, while informal employment and lack of stable jobs hindered integration. Housing satisfaction, while relevant to well-being, did not directly determine community participation. Institutional mechanisms, such as local IDP councils and integration strategies, created structural opportunities for engagement, but actual integration depended strongly on the attitudes of local residents and authorities. Social media and community organizations were found to be the main channels for socio-cultural integration. Perceptions of temporary displacement and migration intentions further shaped integration pathways.

Conclusions. IDP integration is multidimensional, combining access to resources with the openness of host communities. Satisfaction with employment and health services strongly underpins engagement, whereas informal employment represents a barrier. Institutional support alone is insufficient: local attitudes, socio-cultural interaction, and opportunities for participation play decisive roles. The study highlights the importance of tailoring integration policies to local contexts and addressing both structural and socio-cultural dimensions to enhance the integration of IDPs.

Keywords*: internally displaced persons, IDP integration, territorial community, engagement, war, temporariness, migration intentions, Zakarpattia, Ukraine.*

In cites: Provotar Nataliia, Shchuka Halyna, Mezentsev Kostyantyn (2025). Temporariness vs. Integration of Internally Displaced Persons under Uncertainty: The Case of Border Territorial Communities in Zakarpattia. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 349-365. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-26

Introduction

Russia's military aggression has prompted a re-examination of many issues of Ukraine's development, particularly in its regions and cities [1]. The post-war recovery of Ukrainian territorial communities will largely depend on their capacity to rebuild population levels, maintain demographic balance, retain local residents, integrate internally displaced persons (IDPs), and facilitate the return of migrants. In other words, recovery will be shaped by the demographic and migration resilience of communities. The demographic challenges that have persisted in Ukraine since the 1990s have significantly intensified during the war.

Even increased investment appeal of communities and the rising financial capacity of households do not guarantee a reduction in outward migration from Ukraine, especially among young people [2]. Addressing this challenge requires local governments to implement effective development strategies [3] focused on job creation, housing support, social assistance, and building the legal, institutional, eco-

© Provotar Nataliia, Shchuka Halyna, Mezentsev Kostyantyn, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

nomic, and social foundations necessary for the successful integration of IDPs into host communities.

Active combat and forced population movements further exacerbate the asymmetry of migration and demographic resilience. This, in turn, has affected population size, dynamics, and age-sex structure in regions and individual communities, as well as local labor markets, socio-economic indicators of living standards and quality of life across social groups, and broader factors shaping regional development.

Amid a shrinking labor supply in local labor markets, driven by mass emigration of Ukrainians and their mobilization into the Armed Forces, IDPs can serve as – and are increasingly serving as – a vital source of human capital for host communities. Moreover, coordinated efforts of local governments, volunteer organizations, and international donors [4], aimed at realizing the employment, entrepreneurial, educational, and cultural potential of displaced people, can support communities in addressing local challenges and in designing and implementing recovery strategies. Under such conditions, IDPs represent a "community development resource," offering competitive advantages and acting as drivers of qualitative change within territorial communities [5].

IDP status in Ukraine and core registration procedures are regulated by the 2014 Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine "On the Registration of Internally Displaced Persons" [6]. Guarantees for the protection of rights and freedoms, access to temporary housing, healthcare, education, and social support are defined in the 2014 Law of Ukraine "On Ensuring the Rights and Freedoms of Internally Displaced Persons" [7]. At the same time, practical mechanisms for integrating displaced persons into host territorial communities lack a unified framework and largely depend on local context and conditions.

The adaptation of IDPs to new realities occurs in diverse ways and is strongly influenced by age, gender, place or region of origin, socio-economic status, income, disability [8], and other personal characteristics such as tolerance and adaptability to new environments. Another key dimension is the readiness and willingness of host communities to integrate displaced people, which is expressed through the information environment, especially social media, interpersonal communication, and community outreach regarding economic, social, cultural, educational, medical, legal, and other forms of support available to IDPs during both the adaptation and integration stages.

Under conditions of uncertainty, predicting the prospects of integration or return of displaced people is challenging. IDPs are "ordinary people" embedded in specific social, political, and historical contexts [9]. Their migration patterns are likely to differ depending on whether displacement occurs during a short-term emergency or a prolonged war. Nevertheless, it is possible to identify factors that clearly influence integration and return intentions, primarily the duration of the war and the security situation in both places of origin and host communities.

Ferris & Kerwin [10] emphasize that it is time to let go of the assumption that displacement is a short-term phenomenon and accept that displacement is part of the new normal, noting that protracted displacement has become the norm. It is predictable that the longer the war continues, the larger the share of IDPs that will remain in their current places of residence or move abroad, given the economic support and opportunities offered to Ukrainian refugees by different countries. Typically, IDPs receive significantly less international attention than refugees [11]. Although, unlike refugees, IDPs generally do not move into radically different socio-cultural environments and face no formal legal barriers to employment, healthcare, or political participation within their own country, "the reality is more nuanced" [12]. Integration can be hindered by regional stereotypes, stigmatization, cultural biases, lack of institutional support, and local institutional barriers. Therefore, IDPs should be viewed not only through the lens of forced displacement as an anomaly, but also in terms of understanding new forms of normality [13], "abnormal normality".

The case of IDPs in border communities is particularly distinctive. Uncertainty about the future, combined with proximity to the national border, creates conditions for changes in status, including potential transformation into refugees. At the same time, delayed or postponed decisions on deeper integration of IDPs in host border communities increase uncertainty in local policy, hindering the development of sustainable strategies for their inclusion and support.

This article aims to highlight the local specificities of IDP integration in border territorial communities. It analyzes the extent to which forced displacement is experienced as a temporary phenomenon in community life, and whether displaced people can become a resource for community development amid uncertainty about both migration behavior and local integration strategies. The study addresses the following research questions: (1) To which resources in the host community (housing, jobs, healthcare, etc.) does restoring or gaining access most effectively contribute to the integration of IDPs? (2) What is the relationship between host community openness to integration, IDP participation in community life, and perceptions of temporariness under conditions of uncertainty?

Internal Displacement in Ukraine: The Contemporary Discourse

Forced displacement is not a new phenomenon in Ukraine. Natural and technological disasters have previously prompted internal movements within the country. The 1986 Chornobyl nuclear disaster triggered what was, at the time, an unprecedented scale of relocation. However, due to Soviet censorship and the official policy of silence, studies on the integration of displaced persons into host communities were limited and not incorporated into the theoretical discourse. Research on forced displacement caused by destructive floods also tended to be predominantly descriptive and case-based.

The Russian aggression in 2014 led to significant shifts in Ukrainian studies of forced displacement, both in terms of methodology and theoretical contribution. On one hand, this was due to the scale of the phenomenon; on the other, it reflected the increasing integration of Ukrainian researchers into international projects, particularly after 2022. While the number of IDPs after 2014 exceeded 1.3 million, and the armed conflict affected 10 million people [14], by early 2025 the number of IDPs is estimated at 3.7 million, and the war has impacted virtually all Ukrainian citizens.

Research on forced displacement in Ukraine can be broadly categorized into three main strands:

- Quantitative-descriptive studies of the spatial and temporal aspects of forced displacement, including analyses of the number of displaced persons by region, trends over time, reasons for relocation, choice of resettlement, assessment of return factors, and identification of IDP migration behavior patterns;
- Mixed-method studies (quantitative and qualitative) addressing a range of challenges faced by IDPs – legal, economic, social, and psychological – including housing, access to healthcare and education, employment opportunities and unemployment levels, possibilities for learning new professions, socio-cultural differences, territorial identities, and territorial and regional variations.
- Predominantly qualitative studies focusing on the adaptation and integration of IDPs into host territorial communities, local attitudes toward displaced persons, the institutional readiness of communities to integrate IDPs, and the impact of integration on the socio-economic development of host communities.

Tracking the number of IDPs and their accommodation became the initial focus of the Ukrainian academic community. Researchers analyzed the spatial and temporal aspects of forced displacement in Ukraine after 2014, focusing on regional distribution, changes in IDP numbers, and the pressure on host communities [15, 16]. Analysis based on data from IOM rounds of displacement assessments in Ukraine conducted between 2022 and 2024 revealed patterns in IDP dynamics and regional registration trends [17]. The spatial pattern indicates that IDPs predominantly concentrate in regions with one of Ukraine's five metropolitan centers – Kyiv, Kharkiv, Odesa, Dnipro, and Lviv – which are regional hubs, major socio-economic centers, and key nodes in the country's economic system [18].

A substantial body of research has examined the characteristics and determinants of internal displacement in individual regions of Ukraine, particularly those that received the largest numbers of IDPs, including Kharkiv [19], Odesa [20], Lviv [16, 21, 22], and other western regions [23].

Issues of IDP integration into the socio-economic life of host regions, and the adaptation of local social services and labor markets to IDP needs, are closely linked to the impact of relocated enterprises on regional economies [22]. However, studies indicate that enterprise relocation only partially addresses the problem. Not all territories are suitable for accommodating large military-industrial or engineering enterprises; consequently, attention has focused on the need for intensive housing construction and the accelerated development of social infrastructure, particularly in consideration of public attitudes and social sentiment [24].

Research confirms that the cultural and social diversity of a region shapes levels of tolerance, which in turn promotes openness to and acceptance of IDPs from different regions of Ukraine [20]. In this context, in the Western macro-region, the adaptation of displaced persons has been analyzed not only in terms of economic conditions but also through the lens of linguistic and mental landscapes [16].

Forced displacement in Ukraine has emerged as a new urban phenomenon, with significant concentrations of IDPs in large cities [25, 26]. Consequently, urban displacement has clearly localized effects, and municipal administrations have become "front-line actors" [27]. At the city level, a specific micro-geography of displacement has formed: compact housing for IDPs is often situated on city peripheries, whereas overall higher concentrations of IDPs are found in districts offering higher residential comfort [18, 25].

Studies of IDP integration into territorial communities typically focus on specific aspects of integration – economic, social, or planning-related. Economic aspects include training in professions in demand within the community, grant support for new business startups, and the relocation of small enterprises. Social aspects primarily concern social assistance, the physical and economic accessibility of services, psychological support, participation in cultural and sports events, and the creation of com-

munication platforms. Planning aspects involve engaging IDPs in decision-making processes and implementing micro-grants for joint tactical urbanism initiatives between IDPs and local residents (e.g., creating a park or riverside walkway). Such initiatives can be facilitated through participatory budgeting, enabling all city residents to contribute to the creation or renewal of public spaces [28].

Analyses of integration effectiveness have shown that it depends on the coordinated efforts of local governments, state authorities, and civil society institutions [29]. Active involvement of IDPs in developing programs for their multi-faceted integration is crucial for understanding the overall "happiness–pain map" of IDPs in each specific community [18]. A key indicator of successful integration is active engagement in community life and participation in development and local problem-solving initiatives [29].

Successful adaptation depends not only on material support but also on access to information, particularly through local social networks and daily interactions with host communities. Local media, community social networks, and street art can serve as tools to promote a positive image of IDPs, especially when highlighting their contributions to the local economy and cultural life, including cultural traditions they bring. Positive examples include murals dedicated to IDPs or initiatives led by displaced persons to create new public spaces in host cities, thereby fostering diversity and inclusion [30, 31].

Research on the framing of IDP-related issues in local media shows that leading topics include housing, jobs, and social support (so-called "ordinary frames"), while charitable initiatives by leading business figures often receive exaggerated attention. Local media tend to portray IDPs primarily as a group in need of assistance, largely overlooking "peripheral frames" – deeper issues such as "permanent temporariness" and "double temporariness", their hybridity and "shuttling" displacement, everyday emotional-affective impacts of trauma, and the lack of opportunities for invisible IDP voices to be heard [26].

Studies on the adaptation and potential pathways for integrating displaced persons into host territorial communities in Ukraine take into account regional characteristics of their accommodation [32]. In the western regions, research has examined the effects of involving IDPs through public and volunteer organizations in creative activities, such as painting, crafts, or music therapy, to expand social networks and reinforce a sense of belonging [33]. Positive examples of IDP integration in the city of Uzhhorod include the use of social networks and local chat groups for collaboration, as well as initiatives based in religious and humanitarian centers [4].

A 2018 study examining IDPs' self-assessed integration into host territorial communities in Ukraine found that 50% considered themselves fully integrated, while 34% viewed themselves as partially integrated. However, over time, challenges intensified in the absence of long-term solutions, and integration levels increased with greater distance from conflict zones – the lowest level (43%) was observed in regions adjacent to temporarily occupied territories [34].

Data and Methods

This study employs a methodology of comparative cross-contextual interpretation of survey results from internally displaced persons in the territorial communities of the border Berehove District in Zakarpattia Region. The empirical data are analyzed not in isolation but in conjunction with patterns and findings from research on IDP adaptation and integration in other regions and countries. This approach enables a deeper interpretation of the results through the lens of diverse socio-cultural and security contexts, highlighting how local border conditions interact with broader displacement experiences.

Since March 2022, local governments have been tracking IDPs through registration mechanisms in the territorial communities where they arrive. These data are complemented by periodic assessments of actual residents (primarily within urban agglomerations) conducted by mobile network operators. The International Organization for Migration (IOM) in Ukraine regularly monitors and carries out baseline assessments (rounds) of IDP numbers and distribution across territorial communities using rapid telephone surveys. The first baseline assessment (Round 1) was conducted in six administrative districts of Zakarpattia Region in April 2022, and to date, IOM has completed 39 rounds [35].

Since March 2022, local governments have been recording IDPs through registration mechanisms in the territorial communities to which they arrive. These data are supplemented by periodic assessments of actual residents (primarily within urban agglomerations) conducted by mobile network operators. The International Organization for Migration (IOM) in Ukraine regularly monitors and conducts baseline assessments (rounds) of the number and distribution of IDPs across territorial communities using rapid telephone surveys. The first baseline assessment (Round 1) was conducted across six administrative districts of Zakarpattia Region in April 2022, and by now, IOM has conducted 39 rounds [35].

According to IOM estimates, there are 3,665,000 IDPs in Ukraine [35]. IOM data show that by July 2025, 1.1 million Ukrainians who had left the country following the full-scale Russian invasion returned, of whom 340,000 remain regis-

tered as IDPs [36]. Survey results indicate that returns most often involve individual family members, with the primary motivations being the desire to return home or reunite with family (cited by 70% of returnees; among IDPs, 34%) [36].

According to the Information and Computing Center of the Ministry of Social Policy of Ukraine, as of 7 August 2025, 4,569,000 IDPs were officially registered [37]. Estimates by the M.V. Ptukha Institute of Demography and Social Research of the National Academy of Sciences of Ukraine suggest that by mid-April 2022, 5.0–5.5 million people had been forcibly displaced within Ukraine due to Russian military aggression, the majority residing in western regions [24]. Moreover, the highest proportion of IDPs who have fully integrated into their new environments is located in the western regions [5], providing a strong rationale for studying IDP integration in the border communities of Zakarpattia.

Within the framework of the project "Joining Together: Strengthening the Capacity of Coordination Councils on IDPs in Zakarpattia Region", in February 2025 the Berehove District Council on IDPs under the Berehove District Military Administration conducted a needs assessment of IDPs. The assessment followed the Methodological Guidelines for Conducting Needs Assessments of Internally Displaced Persons at the Local Community Level issued by the Ministry for the Reintegration of Temporarily Occupied Territories [38].

Berehove District is located in southern Zakarpattia, directly on the border with Hungary. The district is traversed by international highways and contains three border checkpoints, enabling high daily population mobility. Its favorable socio-geographical and geopolitical location, combined with the historical development of the Ukrainian-Hungarian cross-border region, has fostered intensive integration processes in socio-economic and cultural dimensions [39]. This is a multiethnic space, where Hungarians constitute the majority (76%), alongside Ukrainians (19%) and Roma (4%). In 2022, the district population numbered 206,700, with declines due to depopulation and labor out-migration. Average wages were almost 7% lower than the regional average. The district economy traditionally relies on agriculture (viticulture, horticulture, processing of agricultural products), small border trade, logistics, services, and tourism based on historical-cultural heritage and thermal waters (thermal resorts, rural and wine tourism). Population decline, labor migration, youth outflow, and comparatively low income levels were key development challenges for Berehove District in early 2022 [39].

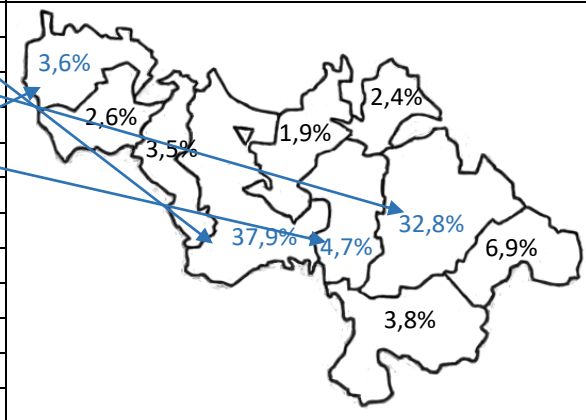
The survey covered 175 displaced persons, of whom 88.6% were women and 11.4% men. The largest age group was 36–65 years (68.6%), youth aged 18–35 constituted 22.3%, and older adults (65+) 9.1%. Almost 60% of respondents were married or in long-term relationships. Regarding education, 47.4% held higher education degrees, 27.4% vocational or pre-tertiary professional education, 21.7% secondary education, and 3.4% primary education or none. Refusal rates were low – only 2.3% of IDPs who were approached declined to participate.

According to the Department of Social Protection of the Zakarpattia Regional Military Administration, in February 2025, 14,449 IDPs were registered in Berehove District, although their distribution across territorial communities was uneven. Similarly, survey participation by IDPs from different communities was disproportionate. Four territorial communities (Berehove, Vynohradiv, Batiovo, and Vylok) accounted for 88.6% of respondents and 79.0% of all registered IDPs in the district. This justified selecting these four communities as the focus of the analysis (Table 1).

Table 1

Distribution of IDPs by Territorial Communities in Berehove District, Zakarpattia Region

Territorial Community	Registered IDPs		IDP Respondents		Berehove District Map
	N	%	N	%	
Berehove	103	58.9	5 471	37.9	
Vynohradiv	21	12.0	4 741	32.8	
Batiovo	17	9.7	514	3.6	
Vylok	14	8.0	672	4.7	
Korolevo	6	3.4	1 000	6.9	
Pyiterfolvo	0	0.0	545	3.8	
Velyka Byihan	1	0.6	510	3.5	
Koson	0	0.0	378	2.6	
Kamianske	9	5.1	349	2.4	
Velyki Berehy	3	1.7	269	1.9	
Refused to answer	1	0.6			
Разом	175	100.0	14 449	100.0	



The survey comprised five thematic sections:

- Demographics: community of registration, region/community of origin, sex, age, marital status, education, and material status;
- Self-assessment of needs satisfaction: housing, employment, social, psychological, legal assistance, medical, educational, and administrative services;
- Non-return factors and migration intentions;
- Assessment of local authorities' activities regarding IDP issues, local residents' attitudes, and sources of information on available opportunities for displaced persons;
- Participation in community life.

Main Findings and Discussion

The primary indicator of integration considered in this study is IDPs' participation in community life. As noted by Chuiko & Fedorenko [40], the more actively IDPs engage in community life without external assistance or government support, the higher their level of integration. Among respondents, roughly equal shares – about 15% – were actively involved in community life and those who did not wish to participate. Another 22% expressed potential interest in participation but were not currently engaged. Less than 2% reported non-participation due to age and/or disability. A notably high proportion, over 46%, found it difficult to answer, indicating those who have not yet decided whether they are interested in deeper community engagement or intend to remain in the community long-term.

Although previous studies have shown that female IDPs tend to integrate more quickly and deeply into host urban communities than males [41], the results of this study revealed a higher share of community-involved men than women (25% versus 13.5%). This is partly explained by the significant imbalance between men and women among respondents (men accounted for only 11.4%) and among registered IDPs overall, as well as by the specific context of the host communities, where men traditionally play a more central role. The highest potential integration by age is observed among those aged 35–65 (17.5%), followed by youth aged 18–35 (10.3%), and older adults (65+) (6.3%).

Education level does not significantly affect participation in host community life, which aligns with Mishchuk et al. [5], who found no significant disparities in self-assessed integration among IDPs with different educational backgrounds. However, IDPs with no formal education or only primary education are the most polarized, showing both the highest share of active participation and the highest share of non-participation. Economic well-being similarly does not serve as a reliable indicator of integration into the host community.

Participation in community life tends to increase with the length of time since displacement: among those displaced between 2014–2021, 40% participate; 2022 – 17%; 2023 – 10%; 2024 – 5%; and 2025 – 0%. Conversely, none of those displaced before 2022 expressed unwillingness to participate, whereas 50% of those displaced in 2025 reported non-participation.

Previous studies have shown that integration into host communities depends on both connections to the place in the past and to present location [42]. Our study found substantial differences in participation across communities. In Batiovo Community, 35.3% of IDP respondents reported active participation, compared to 14.3% in Vylok, 13.6% in Berehove, and only 4.8% in Vynohradiv. The reverse pattern was observed for those unwilling to participate: Vynohradiv – 19.0%, Vylok – 14.3%, Berehove – 13.6%, Batiovo – 5.9% (Fig. 1).

Differences also appear depending on the region of origin. IDPs from Kyiv city and region (50%) and from southern regions (31%) engage most actively in community life, while those from Donetsk and Luhansk (15%) show lower engagement, and the lowest participation comes from Dnipropetrovsk, Zaporizhzhia, Kharkiv, and Sumy regions (5–6%).

Adaptation and integration of IDPs is a process in which individuals strive to meet their needs and reorganize their lives to align with the requirements of a new society after displacement [43]. These processes can be understood through resource-based and socio-cultural approaches. From a resource perspective, adaptation is viewed as adjusting to the loss of significant assets that IDPs held prior to displacement (housing, movable and immovable property, jobs, family and other social ties) and regaining partial or full access to these resources in the new location. Integration in this context implies shared use of resources with host community residents and therefore depends on the community's willingness to provide access and support. The socio-cultural approach considers adaptation as overcoming the shock of changing familiar socio-cultural environments and finding ways to coexist with host community members [43]. Integration, in this sense, entails building social ties between IDPs and locals, engaging displaced persons in daily community life, and providing them with the same rights and opportunities as residents.

Based on these two approaches, we consider IDP integration both in terms of meeting basic resource needs – housing, jobs, and social support – and in terms of openness and hospitality from residents and local authorities of host communities. From the perspective of combining these approaches, Zewude & Siraw [44] emphasize that the key factors motivating IDPs to favor local integration

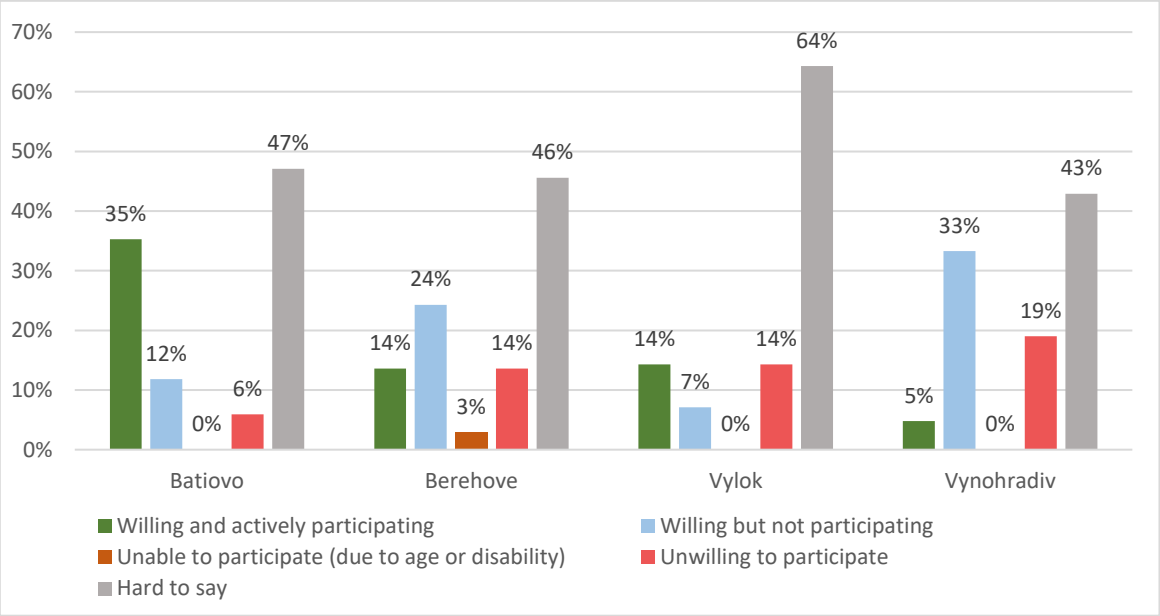


Fig. 1. Responses to the question: "Would you like to participate in the community life where you currently live and in decision-making regarding its development?"

involve both dimensions: access to sources of livelihood (such as job opportunities) and the sharing of similar social identities between IDPs and host communities.

Self-assessment of Needs Satisfaction: Housing, Employment, Education, and Health Care

Forced displacement generates precarious living conditions for IDPs, who face enormous difficulties in meeting their most basic needs, such as access to decent housing, livelihoods of sufficient quality and quantity, health care and sanitation, education, and more [45]. However, host communities can help mitigate the negative impacts of uncertainty and precariousness, primarily by addressing these basic needs. In the conceptual framework of integration developed by Ager & Strang [46] and reproduced in many subsequent studies, four core variables – markers and means – are highlighted: employment, housing, education, and health. This aligns with the "ordinary frames" in local media coverage of IDP issues, which traditionally receive the most attention and, in turn, influence decisions regarding integration [26]. Accordingly, we undertake our assessment of IDPs' (readiness for) integration into host communities by evaluating their satisfaction with key areas: housing, employment, social assistance, preschool and school education, and health care.

The general assumption, based on previous research, is that IDPs who lack their own housing, face employment challenges, and require state support have lower levels of integration [40].

As shown in Table 2, IDPs in the border communities of Zakarpattia are most satisfied with educational and health services, and least satisfied with social assistance. Satisfaction with housing and employment also slightly outweighs dissatisfaction. Thus, the basic conditions for IDP integration are relatively conducive. However, at the level of individual communities, differences are notable for certain indicators, contributing to the formation of local "landscapes" of favorable conditions for integration. For example, dissatisfaction with housing and social assistance is particularly pronounced in the Berehove Territorial Community, while dissatisfaction with employment is highest in Vylok Community. In contrast, the host community does not substantially affect satisfaction with health or educational services.

Since Ukraine has traditionally been considered a "homeowner society," housing is seen as a key prerequisite for integration into host communities [47]. It creates a clear divide between locals and displaced persons in terms of property ownership. At the same time, housing constantly reminds IDPs of the loss of their home and native city. As Zavisca notes [47], homeownership is both a material and symbolic marker of incomplete integration for IDPs.

Our research in border communities shows that willingness to participate in community life, as an indicator of integration, does not depend on housing satisfaction. Among IDP respondents, those actively engaged and those unwilling to participate are equally represented, regardless of whether they are satisfied or dissatisfied with access to housing. (Table 3).

Unlike housing, employment is a key factor for integration. IDPs who wish to and actively participate in community life are higher among those satisfied with their employment situation (18.8% versus 5.5% among those dissatisfied), and vice versa. Dissatisfaction with employment effectively signals

Table 2

Self-assessment of IDPs' Needs Satisfaction in Host Communities of Berehove District, Zakarpattia Region

Basic Needs / Territorial Community	Needs Satisfaction Breakdown (% among respondents who had this need)				Do Not Have This Need (% of all respondents)	Refused to Answer (% of all respondents)
	Completely Satisfied	Rather Satisfied	Rather Dissatisfied	Completely Dissatisfied		
Housing	**14.3**	**37.1**	**20.6**	**28.0**	-	-
Batiovo	0.0	58.8	29.4	11.8	-	-
Berehove	9.7	29.1	23.3	37.9	-	-
Vylok	21.4	50.0	0.0	28.6	-	-
Vynohradiv	33.3	47.6	9.5	9.5	-	-
Employment	**17.6**	**36.1**	**25.2**	**21.0**	**32.0**	**-**
Batiovo	37.5	31.3	6.3	25.0	5.9	-
Berehove	13.2	41.2	32.4	13.2	34.0	-
Vylok	0.0	14.3	28.6	57.1	50.0	-
Vynohradiv	33.3	20.0	13.3	33.3	28.6	-
Social assistance	**8.6**	**29.4**	**31.3**	**30.7**	**6.3**	**0.6**
Batiovo	7.1	50.0	14.3	28.6	17.6	0.0
Berehove	3.2	22.1	38.9	35.8	6.8	1.0
Vylok	28.6	21.4	21.4	28.6	0.0	0.0
Vynohradiv	25.0	30.0	25.0	20.0	4.8	0.0
Preschool education	**53.3**	**40.0**	**6.7**	**0.0**	**82.9**	**-**
Batiovo	100.0	0.0	0.0	0.0	88.2	-
Berehove	57.1	38.1	4.8	0.0	79.6	-
Vylok	-	-	-	-	100.0	-
Vynohradiv	25.0	50.0	25.0	0.0	81.0	-
School education	**63.3**	**29.1**	**6.3**	**1.3**	**54.9**	**-**
Batiovo	83.3	8.3	8.3	0.0	29.4	-
Berehove	59.0	30.8	10.3	0.0	62.1	-
Vylok	50.0	33.3	0.0	16.7	57.1	-
Vynohradiv	62.5	37.5	0.0	0.0	61.9	-
Health care	**18.6**	**44.3**	**27.5**	**9.6**	**4.6**	**-**
Batiovo	25.0	62.5	12.5	0.0	5.9	-
Berehove	12.4	45.4	32.0	10.3	5.8	-
Vylok	38.5	38.5	7.7	15.4	7.1	-
Vynohradiv	28.6	28.6	33.3	9.5	0.0	-

Table 3

Relationship between IDPs' Participation in Community Life and Satisfaction with Basic Needs in Berehove District, Zakarpattia Region (share of responses by category, %)

Basic Needs	Satisfaction	Participation in Community Life				
		Willing and actively participating	Willing but not participating	Unable to participate (due to age or disability)	Unwilling to participate	Hard to say
Housing	Satisfied	12.5	20.5	2.3	12.5	52.3
	Dissatisfied	17.6	23.5	1.2	17.6	40.0
Employment	Satisfied	18.8	23.4	0.0	15.6	42.2
	Dissatisfied	5.5	25.5	0.0	18.2	50.9
Social assistance	Satisfied	16.1	19.4	3.2	17.7	43.5
	Dissatisfied	12.9	24.8	1.0	14.9	46.5
Preschool education	Satisfied	7.1	28.6	0.0	17.9	46.4
	Dissatisfied	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
School education	Satisfied	11.0	21.9	0.0	20.5	46.6
	Dissatisfied	0.0	16.7	0.0	16.7	66.7
Health care	Satisfied	14.3	21.0	1.9	10.5	52.4
	Dissatisfied	17.7	25.8	1.6	21.0	33.9

a lack of interest in community life. This aligns with Ager & Strang (2008), who emphasize the importance of employment for successful integration of resettled persons, even though they often face barriers in finding jobs [48].

IDPs are not a homogeneous group, varying in their employment needs and readiness to integrate [24]. Some have retained previous jobs and intend to return home, and therefore do not plan to integrate into the host community. Others aim to move abroad and similarly consider the host community only a temporary stop. In contrast, those who have lost their homes and see opportunities to resolve housing issues are motivated to seek permanent employment and pursue deeper integration into the community. Consequently, employment challenges differ across communities [24]. Our study highlights these variations – for example, satisfaction with access to jobs in Batiovo Community (68.8% of respondents) is considerably higher than in Vylok Community (14.3%) (Table 2).

Aysa-Lastra [49] emphasizes that access to the labor market may be treated as an indicator of integration in the case of formal employment. However, studies show that IDPs in post-socialist countries often face long-term disadvantages in the labor market and are more likely to work informally [12]. This trend appears consistently across regions, where informal or illegal employment sometimes becomes a coping mechanism for survival [48]. In the case of Berehove District communities, 43.4% of respondents reported having formal jobs (an additional 5.1% remain formally employed but are currently on unpaid leave), while 14.9% identified as unemployed and 9.1% as informally employed. Thus, the overall share of formal employment among surveyed IDPs can be considered comparatively high. Regarding participation in community life, the highest level appears among formally employed IDPs (21.1%), a smaller share among those employed informally (12.0%), and the lowest among unemployed respondents (7.7%) (Table 4). Unwillingness to engage is particularly common among informally employed individuals (18.8%) and peaks among those who reported facing a lack of formal job offers and receiving only or predominantly informal employment options (30.8%). The results therefore support the conclusion that informal employment acts as a barrier to local integration for displaced persons.

Table 4

Relationship between IDPs' Participation in Community Life and Employment Status in Berehove District, Zakarpattia Region (share of responses by category, %)

Employment status	Participation in Community Life			
	Willing and actively participating	Willing but not participating	Unwilling to participate	Hard to say
Formally employed	21.1	22.4	17.1	39.5
Informally employed	12.5	18.8	18.8	50.0
Unemployed	7.7	30.8	7.7	53.8

A less pronounced, yet still noticeable, influence on community integration is linked to satisfaction with health care provision. However, the negative side of this effect is stronger: a considerably larger share of respondents dissatisfied with health services express unwillingness to engage in community activities. Satisfaction with social assistance does not substantially influence community integration. A similar pattern appears for preschool and school education, though here it is largely due to the small number of respondents who reported dissatisfaction with educational services.

Community Integration: Host Community Residents, Local Authorities, and IDPs

Meeting basic needs (housing, jobs, social assistance) is a necessary, but not sufficient, condition for full IDP integration, as highlighted by [47]. Under severe challenges caused by war, occupation of communities, and urbicide, differences differences between IDPs and local residents often recede into the background [48], yet tensions may intensify over time. Integration is more likely to strengthen when communities actively involve IDPs in social, political, and cultural life, providing them with equal rights and opportunities for full participation in community affairs [5, 46, 47, 50]. Unlike the approach once taken by the Georgian government, where concerns that integration could reduce incentives for return and weaken territorial claims limited support for IDP inclusion [51], Ukraine develops institutional pathways to enable integration. However, their effectiveness depends on local authorities' capacity and, more broadly, on each community's institutional ability to engage IDPs and prevent social isolation [29, 33].

Berehove District established the Council on Internally Displaced Persons in November 2023 as an advisory body [52]. The Council prioritizes supporting territorial communities in building effective adaptation and integration mechanisms and encour-

ages IDP participation in local decision-making by involving displaced persons in working groups, commissions, and advisory bodies that develop local programs protecting IDP rights and interests, including social protection, employment, housing, and property rights. In June 2025, the Council approved the Strategy for IDP Integration in Berehove District through 2030 [53]. The Strategy aims to integrate IDPs into economic, social, and cultural life so they become an essential part of the community, meet their own needs independently, and take an active role in local development. Key priorities include: long-term housing solutions that ensure dignified living conditions; stable employment and support for entrepreneurship and self-employment; equal access to quality health, educational, and social services, and mental-health and legal support that help displaced families cope with war-related stress and trauma. The Strategy also advances IDP inclusion in civic life and local governance, strengthens community communication, and reduces discrimination and social tensions through awareness-building and institutional cooperation.

Thus, the case-study communities have created institutional foundations for IDP integration, but actual community attitudes remain equally critical. As noted by Havryliuk [18], integration challenges include not only unemployment, financial hardship, and housing shortages, but also conflicts between IDPs and local residents, along with social stigmatization.

When asked whether they had faced biased treatment due to their IDP status, 52.6% reported no such experience. However, about a third (32.6%) acknowledged encountering bias, while 14.9% found it difficult to answer. Respondents most often experienced bias in the areas of housing rental or purchase (12.6%), social protection (10.9%), health care (10.3%), everyday social relations (9.7%), civic and political participation (8.0%), employment (7.4%), and education (4.0%). Compared to other areas, jobs and education show lower levels of perceived bias, which aligns with earlier findings indicating that job satisfaction supports stronger community involvement.

Among those who experienced bias due to their IDP status, 17.5% actively engage in community life – slightly more than among those who did not report bias (14.9%). Conversely, the share of respondents unwilling to participate in community life is higher among those who did not experience bias (17.0% versus 14.0%). These results suggest that experiencing bias can, to some extent, motivate IDPs to engage in community life to influence local perceptions and drive positive change.

Respondents evaluate local authorities' efforts to address IDP needs almost evenly: 38.2% express positive assessments and 41.7% negative ones. Among those who evaluate local authority efforts positively, 19.4% actively participate in community life, compared to 13.6% among those who express negative evaluations.

At the community level (Table 5), assessments of both resident and authority attitudes toward IDPs further support the conclusion that local openness influences integration. The highest community participation level, as previously mentioned, is recorded in Batiovo Community, where over 82% of respondents reported no discrimination experiences and 59% positively evaluate local authorities' actions. Berehove Community shows the highest proportion of respondents reporting discrimination and negative authority assessments. These findings illustrate meaningful differences even among neighboring border communities within the same district.

Integration patterns also relate to respondents' places of origin: IDPs from Donetsk and Luhansk regions predominate in Vylok (85.7%), Berehove

Table 5

Assessment of Attitudes Toward IDPs and of Local Authorities' Efforts to Address Their Needs in Berehove District, Zakarpattia Region

Bias experienced by IDPs	**No**		**Yes**		**Hard to say**	**Refused to answer**
All communities	***52,6***		***32,6***		***14,9***	**-**
Batiovo	82,4		5,9		11,8	-
Berehove	42,7		39,8		17,5	-
Vylok	50,0		35,7		14,3	-
Vynohradiv	57,1		28,6		14,3	-
Assessment of local authorities' efforts in addressing IDPs' issues	**Very good**	**Rather good**	**Rather poor**	**Very poor**	**Hard to say**	**Refused to answer**
All communities	***17,1***	***21,1***	***15,4***	***26,3***	***19,4***	***0,6***
Batiovo	35,3	23,5	0,0	5,9	29,4	5,9
Berehove	10,7	6,8	22,3	37,9	22,3	0,0
Vylok	21,4	42,9	0,0	7,1	28,6	0,0
Vynohradiv	14,3	61,9	9,5	9,5	4,8	0,0

(52.4%), and Vynohradiv (47.6%) communities, while respondents from Kherson and Mykolaiv regions constitute the largest group in Batiovo Community (47.1%).

The findings therefore support the view that the pathway to integration is largely shaped by local authorities and the ways in which they portray IDPs in local media [54]. Given that host communities may share socioeconomic and cultural commonalities with the places IDPs come from, this can lower friction in adaptation and potentially facilitate inclusion, yet it may also amplify misunderstandings or (mutual) non-acceptance [47].

Another dimension of integration through sociocultural interaction is inclusion in the local information space. Elareshi et al. [55] find that social media platforms (particularly Facebook), online news sites, along with word of mouth are the most accessible and convenient information channels for IDPs. Traditional media (TV, radio, newspapers) continue to be used, but gradually lose prominence. Social media enables IDPs to present their own narratives within host communities [56], while sustaining emotional connection with their home communities. This reliance on social media fosters hybridity, where ties with home society remain strong while relationships with host communities also deepen [57].

Our study confirms these observations. IDPs living in the border communities of Zakarpattia identify their primary information sources as social media platforms (Facebook, Instagram, YouTube) – 56.6% of respondents; messengers and group chats (Viber, Telegram, WhatsApp) – 53.7%; and interpersonal communication (via relatives, friends, and neighbors) – 52%. Traditional media play a marginal role: printed press – 5.1%; television – 2.9%; radio – 1.1%. Personal communication with government officials (7.4%) and information materials or bulletin boards in social or administrative institutions (4.0%) also show limited reach. Meanwhile, NGOs and charitable organizations act as a meaningful information mediator between IDPs and local communities – 25.1% of respondents cite them as a source. The highest levels of community participation are observed among respondents who rely on social media platforms and civic or charitable organizations, indicating that sociocultural integration is primarily facilitated through social networks and civic initiatives.

Differences between communities are also significant. Social media platforms are cited as an information source by 94.1% of IDPs in Batiovo Community, compared to 57.1% in Vylok, 52.4% in Vynohradiv, and 47.6% in Berehove.

Integration into host communities is also influenced by how IDPs perceive temporariness, by their migration intentions, and by whether they plan to return, relocate within Ukraine, or move abroad. Previous studies identify multiple narratives around IDP visions of (non-)return to occupied home cities [58]: absence of return intentions due to perceived lack of prospects for change; non-return due to safety concerns; intent to return only to restore justice or legality; or conditional return aspirations that focus not on the city itself but on “home” as a symbolic space (“if only it were possible to return to a home untouched by war” or “if home could be carried along”). Integration is also shaped by the perceived short- and long-term prospects of home communities: intact or slightly damaged housing supports return intentions, while home destruction forms a critical obstacle to return [24].

IDP respondents from Zakarpattia’s border communities most often cite direct threats to life and health as the reasons for not returning: ongoing hostilities (62.9%) and occupation (34.9%). Those displaced by active hostilities show lower motivation to integrate (only 11.8% participating in community life; 16.4% unwilling to engage). In contrast, respondents whose home communities are under occupation demonstrate stronger integration intentions, with 24.6% actively participating and 13.1% not wishing to do so.

Access to basic resources in host communities is rarely cited as a key reason for not returning: housing – 5.1%; children’s education – 5.7%; specialized medical care – 4.6%.

Respondents who plan to relocate within the next six months (only 4% of the sample) show no substantial difference in integration levels compared to those who do not plan to move. In practice, many IDPs postpone final decisions between local integration and further resettlement [10]. This condition of protected temporariness and incomplete or postponed integration can increase tension between IDPs and local residents, particularly local authorities who seek greater certainty.

Conclusions

IDP integration into host communities can be conceptualized through multiple indicators and corresponding integration dimensions – economic, social, cultural, and emotional. Under conditions of uncertainty, including ongoing war and unclear prospects for home communities, identifying IDP integration intentions remains methodologically challenging. One productive approach is to examine IDP involvement in host community life and local development decision-making. For the Berehove District border communities examined here, we consider this approach appropriate. Although only 15% of respondents clearly report active community involvement, almost half found it difficult to assess their own level of participation, making this uncertainty an important finding. The strongest determi-

nants of community participation are displacement duration, current place of residence and past location, age, and gender.

Integration through access to basic resources (housing, employment, health care, education) and integration through favorable attitudes and openness from local residents and authorities represent two complementary sides of the same process. In these border communities, satisfaction (or lack thereof) with employment and health care provision emerged as the most meaningful integration preconditions, while housing satisfaction did not. Informal employment is identified as a tangible barrier to integration.

Despite institutional integration pathways being established in recent years, their impact is ultimately moderated by actual community attitudes. One-third of respondents report having experienced biased treatment, most often in housing, social protection, and health care. Employment-related bias, however, remains comparatively low, supporting its positive integration influence. Local-authority performance assessments also correlate with different integration levels across host communities.

Perceptions of temporariness and uncertainty predictably slow integration. Respondents whose home communities are occupied show stronger motivation to integrate. At the same time, protected temporariness and incomplete or postponed integration contribute to tensions with host communities that seek more clear commitments.

In Ukraine, the research focus on IDPs issues is increasingly shifting from the regional to the local level. Local environments of access to integration resources, institutional openness, and authority and resident readiness to support new community members vary sharply even among seemingly similar neighboring border communities. These differences shape distinct local landscapes of opportunity, both in terms of access to essential resources for integration and in the openness of residents and local authorities to newcomers seeking a new sense of normalcy.

Bibliography

1. *Підгрушний Г.П., Провотар Н.І., Дудін В.С. (2023). Просторові особливості розвитку Київського метрополісного регіону: виміри поліцентричності. Український географічний журнал, 1, 23–34. DOI: https://doi.org/10.15407/ugz2023.01.023*
2. *Мезенцев К., Провотар Н., Паренюк В. (2020). Економічні фактори регіональної диференціації безробіття та міграційних намірів молоді в Україні. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Географія, 1-2(76-77), 16–23. DOI: https://doi.org/10.17721/1728-2721.2020.76-77.2*
3. *Parenyuk, V., Provotar, N., & Mezentsev, K. (2021). Youth migration in Ukraine: regional dimension. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Geology. Geography. Ecology, (54), 240–253. DOI: https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-54-18*
4. *Токар П., Зуб С. (2025). Інтеграція внутрішньо переміщених осіб у міське середовище Ужгорода в умовах війни: виклики, досвід та перспективи. Геополітичні пріоритети України, 1(34), 86–97. DOI: https://doi.org/10.24144/2078-1431.2025.1(34).86-97*
5. *Mishchuk, H., Samoliuk, N., Krol, V., & Vasa, L. (2024). Social Integration of Internally Displaced Persons in Ukraine: Perceptions from IDPs vs. the Host Population. Economics and Sociology, 17(4), 61–81. DOI: https://doi.org/10.14254/2071-789X.2024/17-4/4*
6. *Про облік внутрішньо переміщених осіб (2014). Постанова Кабінету Міністрів України від 1 жовтня 2014 р., № 509. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/509-2014-%D0%BF#Text*
7. *Про забезпечення прав і свобод внутрішньо переміщених осіб (2014). Закон України від 20 жовтня 2014 р., № 1706-VII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1706-18#Text*
8. *Global Report on Internal Displacement (2019). The Internal Displacement Monitoring Centre. URL: https://www.internal-displacement.org/global-report/grid2019*
9. *Turton, D. (2003) Refugees, Forced Resettlers and 'Other Forced Migrants': Towards a Unitary Study of Forced Migration. New Issues in Refugee Research. Working Paper, 94. Geneva, UNHCR. 23. URL: https://www.unhcr.org/media/refugees-forced-resettlers-and-other-forced-migrants-towards-unitary-study-forced-migration*
10. *Ferris, E., & Kerwin, D. (2023). Durable Displacement and the Protracted Search for Solutions: Promising Programs and Strategies. Journal on Migration and Human Security, 11(1), 3–22. DOI: https://doi.org/10.1177/23315024231160454*
11. *Sasse, G. (2020). War and Displacement: The Case of Ukraine. Europe-Asia Studies, 72(3), 347–353. DOI: https://doi.org/10.1080/09668136.2020.1728087*
12. *Ivlevs, A., & Veliziotis, M. (2018). Beyond Conflict: Long-term Labour Market Integration of Internally Displaced Persons in Post-Socialist Countries. Journal of Vocational Behavior, 105, 131–146. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jvb.2017.12.003*
13. *Bakewell, O. (2008). Research Beyond the Categories: The Importance of Policy Irrelevant Research into Forced Migration. Journal of Refugee Studies, 21(4), 432–453. DOI: https://doi.org/10.1093/jrs/fen042*
14. *Karácsonyi, D., Mezentsev, K., Pidgrusnyi, G., & Dövényi, Z. (2014). From Global Economic Crisis to Armed Crisis: Changing Regional Inequalities in Ukraine. Regional Statistics, 4(2), 18–39. DOI: https://doi.org/10.15196/RS04202*
15. *Логвинова М. О. (2020). Просторово-часові особливості внутрішнього переміщення населення в Україні. Наукові записки СумДПУ імені А.С. Макаренка. Географічні науки, 2, 1, 134–142. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.3746012*

16. Влах М. Географічний профіль внутрішнього вимушеного переселення в Україні як наслідок воєнних дій (2023). Географічна освіта та наука: виклики і поступ. Львів, 252–257.
17. Джаман В. О., Джаман Я.В. (2024). Просторовий прояв міграційних потоків внутрішньо переміщених осіб в Україні. Український географічний журнал, 4, 55–63. DOI: https://doi.org/10.15407/ugz2024.04.055
18. Гаврилюк О. (2024). Соціально-економічні виклики інтеграції та просторового розподілу внутрішньо переміщених осіб унаслідок війни. Демографія та соціальна економіка, 1 (55), 114–132. DOI: https://doi.org/10.15407/dse2024.01.114
19. Нємець Л. М., Гусєва Н. В., Логвинова М. О., Кандиба Ю. І., Ключко Л. В. (2018). Вимушені внутрішні міграції в Харківській області: структурно-динамічні та регіональні особливості. Часопис соціально-економічної географії, 25, 81–97. DOI: https://doi.org/10.26565/2076-1333-2018-25-08
20. Остра В.А., Яворська В.В., Куделіна С.Б. (2023). Просторові особливості та суспільно-економічні проблеми вимушеного внутрішнього переміщення населення в Одеській області. Вісник ОНУ. Географічні та геологічні науки, 28, 2(43), 66–78. DOI: https://doi.org/10.18524/2303–9914.2023.2(43).292732
21. Гудзеляк І. (2023). Географія внутрішньо переміщених осіб у Львівській області. Географічна освіта та наука: виклики і поступ. Львів, 257–260.
22. Ванда І., Котик Л. (2023). Внутрішньо переміщені особи як виклик розвитку Львівської області: просторові аспекти. Географічна освіта та наука: виклики і поступ. Львів, 268–273.
23. Джаман Я. В., Джаман В. О. (2024). Географія внутрішньо переміщених осіб у західному регіоні України: обсяги, напрямки, наслідки, проблеми. Науковий вісник Чернівецького університету: Географія, 847, 125–134. DOI: https://doi.org/10.31861/geo.2024.847.125-134
24. Лібанова Е., Позняк О., Цимбал О. (2022). Масштаби та наслідки вимушеної міграції населення України внаслідок збройної агресії Російської Федерації. Демографія та соціальна економіка, 48, 2, 37–57. DOI: https://doi.org/10.15407/dse2022.02.037
25. Мезенцев К. (2020). Внутрішньо переміщені особи у містах: мікрогеографія вимушеного переселення. Регіон-2020: стратегія оптимального розвитку. Харків, 19–21.
26. Mezentsev, K., & Kuznetsova, E. (2022). What Shapes the Narratives on Internally Displaced People in Dnipro Media? In: T. Kuzio, S.I. Zhuk, & P. D'Anieri (Eds). Ukraine's Outpost: Dnipropetrovsk and the Russian-Ukrainian War. Bristol: E-International Relations. URL: https://www.e-ir.info/2022/02/02/what-shapes-the-narratives-on-internally-displaced-people-in-dnipro-media
27. Guterres, A. (2010). Protection Challenges for Persons of Concern in Urban Settings. Forced Migration Review, 34, 8–9. URL: https://www.fmreview.org/guterres-2
28. Мезенцев К.В., Провотар Н.І., Пальчук М.В. (2020). Публічні простори через призму партисипативного міського планування – приклад Києва. Український географічний журнал, 2, 30–37. DOI: https://doi.org/10.15407/ugz2020.02.030
29. Мінакова Є.В. (2023). Інституційна спроможність органів місцевого самоврядування щодо інтеграції внутрішньо переміщених осіб у приймаючій громаді: правові та практичні аспекти. Наукові інновації та передові технології, 12(26), 245–255. DOI: https://doi.org/10.52058/2786-5274-2023-12(26)-245-255
30. Провотар Н.І., Олішевська Ю.А., Мезенцев К.В., Кравченко К.А. (2021). Вуличне мистецтво у міському просторі: розміщення та сприйняття у містах України. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», (55), 216–231. DOI: https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-55-16
31. Garcia Ferrari, M. S., Mezentsev, K., Provotar, N., Iliadi, M., Kartalou, N.-S. (2024). Displaced Public Spaces in Ukrainian Cities: Increasing Diversity and Inclusion in Urban Reconstruction through Temporary Occupation. ZARCH: Journal of Interdisciplinary Studies in Architecture and Urbanism, 22, 76–89. https://doi.org/10.26754/ojs_zarch/zarch.2024229877
32. Смаль В., Позняк О. (2016). Внутрішньо переміщені особи: Соціальна та економічна інтеграція в приймаючих громадах. Київ, 93. URL: https://www.slideshare.net/slideshow/ss-91693812/91693812
33. Кузьмін В., Стрижак Г. (2024). Соціальні наслідки російсько-української війни: адаптація внутрішньо переміщених осіб в українському суспільстві. Соціополіс: Журнал соціальних та політичних наук, 1, 30-37. URL: https://sociopolis.in.ua/index.php/journal/issue/view/1
34. Niemets, L. M., Husieva, N. V., Pohrebskyi, T. H., Bartosh, O. V., & Lohvynova, M. O. (2020). Integration of Internally Displaced Persons of Ukraine: Realities, Problems, Perspectives. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, Series Geology. Geography. Ecology, (51), 140–157. DOI: https://doi.org/10.26565/2410-7360-2019-51-10
35. Ukraine. Displacement Tracking Mapping (2025). Global Data Institute. International Organization for Migration. URL: https://dtm.iom.int/ukraine
36. Returning Home from Abroad: Trends, Drivers, and Reintegration Challenges among Ukrainian Returnees from Abroad (2025). Thematic Brief, July 2025. Global Data Institute. International Organization for Migration. URL: https://dtm.iom.int/reports/ukraine-returning-home-abroad-july-2025
37. Internally displaced persons (2025). Information and Computing Center of the Ministry of Social Policy of Ukraine. URL: https://www.ioc.gov.ua/analytics/dashboard-vpo
38. Про затвердження Методичних рекомендацій щодо проведення оцінювання потреб внутрішньо переміщених осіб на місцевому рівні громади (2024). Наказ Міністерства з питань реінтеграції тимчасово окупованих територій від 13 вересня 2024 року, № 288. URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0288925-24#Text
39. Підгрушний Г.П., Коваль К.П., Молнар Й.Й., Гомокі Е. (2017). Українсько-угорське прикордоння: можливості та перспективи розвитку в контексті європейських інтеграційних процесів. Український географічний журнал, 4, 20–30. DOI: https://doi.org/10.15407/ugz2017.04.020

40. Chuiko, O., & Fedorenko, O. (2020). Levels of Social Integration of Internally Displaced Persons in the Host Community. Regional Formation and Development Studies, 31(2), 7–16. DOI: https://doi.org/10.15181/rfds.v31i2.2093
41. Havryliuk, O. (2022). Spaces of Internal Displacement: Understanding the Hidden Urban Geographies of Armed Conflict in Ukraine. Moravian Geographical Reports, 30(1), 2–21. DOI: https://doi.org/10.2478/mgr-2022-0001
42. Lundgren, M. (2016). Place Matters: Return Intentions among Forcibly Displaced Young Georgians from Abkhazia Living in Tbilisi and Zugdidi. Caucasus Survey, 4(2), 129–148. DOI: https://doi.org/10.1080/23761199.2016.1162569
43. Ryan, D., Dooley B., & Benson C. (2008). Theoretical Perspectives on Post-Migration Adaptation and Psychological Well-Being among Refugees: Towards a Resource-Based Model. Journal of Refugee Studies, 21(1), 1–18. DOI: https://doi.org/10.1093/jrs/fem047
44. Zewude, B. & Siraw, G. (2024). Sustainable Integration of Internally Displaced Persons (IDPs) in Ethiopia: Exploring Intentions about Post-Conflict Resettlement Choices. Cogent Social Sciences, 10(1), 2350116. DOI: https://doi.org/10.1080/23311886.2024.2350116
45. Zongo, S, Ouedraogo, I. & Soma, A. (2024). Internally Displaced Persons and Socio-territorial Integration in the Commune of Kaya in Burkina Faso. A Sustainable Solution Study, 25(4), 21–29. DOI: https://doi.org/10.9734/AIR/2024/v25i41077
46. Ager, A., & Strang, A. (2008). Understanding Integration: A Conceptual Framework. Journal of Refugee Studies, 21(2), 166–191. DOI: https://doi.org/10.1093/jrs/fen016
47. Zavisca, J.R., Mitchneck, B., & Gerber, T.P. (2023). Housing and Integration of Internally Displaced Persons: The Case of Ukraine in 2018. Frontiers in Human Dynamics, 5, 1086064. DOI: https://doi.org/10.3389/fhumd.2023.1086064
48. Oginni, S.O., Opoku, M.P., & Alupo, B.A. (2018). Terrorism in the Lake Chad Region: Integration of Refugees and Internally Displaced Persons. Journal of Borderlands Studies, 35(5), 725–741. DOI: https://doi.org/10.1080/08865655.2018.1457975
49. Aysa-Lastra, M. (2011). Integration of Internally Displaced Persons in Urban Labour Markets: A Case Study of the IDP Population in Soacha, Colombia. Journal of Refugee Studies, Vol. 24(2), 277–303. DOI: https://doi.org/10.1093/jrs/feq054
50. Кравчук С.Л. (2023). Чинники ефективної інтеграції ВПО в територіальні громади. Габітус, 49, 193–198. DOI: https://doi.org/10.32782/2663-5208.2023.49.33
51. Gogishvili, D. & Harris-Brandts, S. (2019). The Social and Spatial Insularity of Internally Displaced Persons: "Neighbourhood Effects" in Georgia's Collective Centres. Caucasus Survey, 7(2), 134–156. DOI: https://doi.org/10.1080/23761199.2019.1617652
52. Положення про Раду з питань внутрішньо переміщених осіб при Берегівській районній військовій адміністрації (2023). URL: https://rada.info/upload/users_files/04053708/c65141a3a6705dfbb10c6af0c99b70cb.doc
53. Стратегія інтеграції внутрішньо переміщених осіб у Берегівському районі Закарпатської області на період до 2030 року (2025). URL: https://bereg-rda.gov.ua/news/1750842316
54. Roshchyk, I., Bilan, Y., Krol, V., & Mishchuk, H. (2024). Social Integration of Internally Displaced Persons in Ukraine: Problems and Challenges for Governing Local Communities. Problems and Perspectives in Management, 22(1), 728–740. DOI: https://doi.org/10.21511/ppm.22(1).2024.57
55. Elareshi, M., Ziani, A., & Alsridi, H. (2023). The Perceptions of Iraqi Internally Displaced Persons of Social Media Use during War and Conflict. Jurnal Komunikasi: Malaysian Journal of Communication, 39(1), 21–36. DOI: https://doi.org/10.17576/JKMJC-2023-3901-02
56. Mancini, T., Sibilla, F., Argiropoulos, D., Rossi, M., & Everri, M. (2019). The Opportunities and Risks of Mobile Phones for Refugees' Experience: A Scoping Review. PLoS ONE, 14(12), e0225684. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225684
57. Khan, M.I., & Saleem, N. (2020). Social Media Dependency and Socio-Cultural Integration: Case of Internally Displaced Persons in Pakistan. Pakistan Social Sciences Review, 4(3), 52–65. DOI: http://doi.org/10.35484/pssr.2020(4-III)05
58. Mezentsev, K., & Mezentsev, O. (2022). War and the City: Lessons from Urbicide in Ukraine. Czasopismo Geograficzne, 93(3), 495–521. DOI: https://doi.org/10.12657/czageo-93-20

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

References

1. Pidgrushnyi, G.P., Provotar, N.I., & Dudin, V.S. (2023). Spatial Characteristics of the Kyiv Metropolitan Region Development: The Dimensions of Polycentricity. Ukrainian Geographical Journal, 1, 23–34. [in Ukrainian]. DOI: https://doi.org/10.15407/ugz2023.01.023
2. Mezentsev, K., Provotar, N., & Pareniuk, V. (2020). Economic Factors of Regional Differentiation of Young People's Unemployment and Migration Intentions in Ukraine. Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geography, 1-2(76-77), 16–23. [in Ukrainian]. DOI: https://doi.org/10.17721/1728-2721.2020.76-77.2
3. Parenyuk, V., Provotar, N., & Mezentsev, K. (2021). Youth migration in Ukraine: regional dimension. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (54), 240–253. DOI: https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-54-18

4. *Tokar, P., & Zub, S. Integration of internally displaced persons into the urban environment of Uzhhorod in wartime conditions: challenges, experience and prospects. Geopolitical Priorities of Ukraine, 2025, 1(34), 86–97. [in Ukrainian]. DOI: https://doi.org/10.24144/2078-1431.2025.1(34).86-97*
5. *Mishchuk, H., Samoliuk, N., Krol, V., & Vasa, L. (2024). Social Integration of Internally Displaced Persons in Ukraine: Perceptions from IDPs vs. the Host Population. Economics and Sociology, 17(4), 61–81. DOI: https://doi.org/10.14254/2071-789X.2024/17-4/4*
6. *On the Registration of Internally Displaced Persons (2014). Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of 1 October 2014, No. 509. [in Ukrainian]. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/509-2014-%D0%BF#Text*
7. *On Ensuring the Rights and Freedoms of Internally Displaced Persons (2014). Law of Ukraine of 20 October 2014, No. 1706-VII. [in Ukrainian]. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1706-18#Text*
8. *Global Report on Internal Displacement (2019). The Internal Displacement Monitoring Centre. URL: https://www.internal-displacement.org/global-report/grid2019*
9. *Turton, D. (2003) Refugees, Forced Resettlers and 'Other Forced Migrants': Towards a Unitary Study of Forced Migration. New Issues in Refugee Research. Working Paper, 94. Geneva, UNHCR. 23. URL: https://www.unhcr.org/media/refugees-forced-resettlers-and-other-forced-migrants-towards-unitary-study-forced-migration*
10. *Ferris, E., & Kerwin, D. (2023). Durable Displacement and the Protracted Search for Solutions: Promising Programs and Strategies. Journal on Migration and Human Security, 11(1), 3–22. DOI: https://doi.org/10.1177/23315024231160454*
11. *Sasse, G. (2020). War and Displacement: The Case of Ukraine. Europe-Asia Studies, 2020, 72(3), 347–353. DOI: https://doi.org/10.1080/09668136.2020.1728087*
12. *Ivlevs, A., & Veliziotis, M. (2018). Beyond Conflict: Long-term Labour Market Integration of Internally Displaced Persons in Post-Socialist Countries. Journal of Vocational Behavior, 105, 131–146. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jvb.2017.12.003*
13. *Bakewell, O. (2008). Research Beyond the Categories: The Importance of Policy Irrelevant Research into Forced Migration. Journal of Refugee Studies, 21(4), 432–453. DOI: https://doi.org/10.1093/jrs/fen042*
14. *Karácsonyi, D., Mezentsev, K., Pidgrusnyi, G., & Dövényi, Z. (2014). From Global Economic Crisis to Armed Crisis: Changing Regional Inequalities in Ukraine. Regional Statistics, 4(2), 18–39. DOI: https://doi.org/10.15196/RS04202*
15. *Lohvynova, M.O. (2020). Spatio-temporal Features of the Internal Displacement of the Population in Ukraine. Scientific Notes of Sumy State Pedagogical University. Geographical Sciences, Vol. 2(1), 134–142. [in Ukrainian]. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.3746012*
16. *Vlah, M. (2023). Geographical profile of internal forced displacement in Ukraine as a consequence of military actions. Geographical Education and Science: Challenges and Advancement. Lviv, pp. 252–257. [in Ukrainian].*
17. *Dzhaman, V.O., & Dzhaman, Ya.V. (2024). Spatial Manifestation of Migration Flows of Internally Displaced Persons in Ukraine. Ukrainian Geographical Journal, 4, 55–63. [in Ukrainian]. DOI: https://doi.org/10.15407/ugz2024.04.055*
18. *Havryliuk, O. (2024). Socio-Economic Challenges of Integration and Spatial Distribution of War-Induced Internally Displaced Persons. Demography and Social Economy, 1 (55), 114–132. [in Ukrainian]. DOI: https://doi.org/10.15407/dse2024.01.114*
19. *Niemets, L. M., Husieva, N. V., Lohvynova, M. O., Kandyba, Yu.I., & Kliuchko, L. V. (2018). Forced Internal Migration in the Kharkiv Region: Structural-Dynamic and Regional Features. Human Geography Journal, 25, 81–97. [in Ukrainian]. DOI: https://doi.org/10.26565/2076-1333-2018-25-08*
20. *Ostra, V., Yavorska, V., & Kudelina, S. (2023). Spatial features and socio-economic problems of forced internal displacement in the Odesa Region. Bulletin of ONU. Geographical and Geological Sciences, 28, 2(43), 66–78. [in Ukrainian]. DOI: https://doi.org/10.18524/2303–9914.2023.2(43).292732*
21. *Hudzelyak, I. (2023). Geography of Internally Displaced Persons in the Lviv Region. Geographical Education and Science: Challenges and Advancement. Lviv, 257–260. [in Ukrainian].*
22. *Vanda, I., & Kotyk, L. (2023). Internally displaced persons as a challenge to the development of Lviv region: spatial aspects. Geographical Education and Science: Challenges and Advancement. Lviv, 268–273. [in Ukrainian].*
23. *Dzhaman, Ya., & Dzhaman, V. (2024). Geography of Internally Displaced Persons in the Western Region of Ukraine: Volumes, Directions, Consequences, Problems. Scientific Herald of Chernivtsi University: Geography, 847, 125–134. [in Ukrainian]. DOI: https://doi.org/10.31861/geo.2024.847.125-134*
24. *Libanova, E., O., Pozniak O., & Tsymbal, O. (2022). Scale and Consequences of Forced Migration of the Population of Ukraine as a Result of Armed Aggression of the Russian Federation. Demography and Social Economy, 48(2), 37–57. [in Ukrainian]. DOI: https://doi.org/10.15407/dse2022.02.037*
25. *Mezentsev, K. (2020). Internally Displaced Persons in Cities: Micro-Geography of Forced Displacement. Region-2020: Strategy for Optimal Development. Kharkiv. [in Ukrainian].*
26. *Mezentsev, K., & Kuznetsova, E. (2022). What Shapes the Narratives on Internally Displaced People in Dnipro Media? In: T. Kuzio, S.I. Zhuk, & P. D'Anieri (Eds). Ukraine's Outpost: Dnipropetrovsk and the Russian-Ukrainian War. Bristol: E-International Relations. URL: https://www.e-ir.info/2022/02/02/what-shapes-the-narratives-on-internally-displaced-people-in-dnipro-media*
27. *Guterres, A. (2010). Protection Challenges for Persons of Concern in Urban Settings. Forced Migration Review, 34, 8–9. URL: https://www.fmreview.org/guterres-2*
28. *Mezentsev, K.V., Provotar, N.I., & Palchuk, M.V. (2020). Public Spaces through the Lens of Participatory Urban Planning – The Case of Kyiv. Ukrainian Geographical Journal, 2, 30–37. [in Ukrainian]. DOI: https://doi.org/10.15407/ugz2020.02.030*

29. Minakova, Ye. (2023). Institutional Capacity of Local Government Bodies Regarding the Integration of Internally Displaced Persons in the Host Community: Legal and Practical Aspects. Scientific Innovations and Advanced Technologies, 12(26), 245–255. [in Ukrainian]. DOI: https://doi.org/10.52058/2786-5274-2023-12(26)-245-255
30. Provotar, N., Olishevska, Yu., Mezentsev, K., & Kravchenko, K. (2021). Street Art in Urban Space: Location and Perception in Ukrainian Cities. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (55), 216–231. [in Ukrainian]. DOI: https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-55-16
31. Garcia Ferrari, M. S., Mezentsev, K., Provotar, N., Iliadi, M., Kartalou, N.-S. (2024). Displaced Public Spaces in Ukrainian Cities: Increasing Diversity and Inclusion in Urban Reconstruction through Temporary Occupation. ZARCH: Journal of Interdisciplinary Studies in Architecture and Urbanism, 22, 76–89. https://doi.org/10.26754/ojs_zarch/zarch.2024229877
32. Smal, V., & Pozniak O. (2016). Internally Displaced Persons: Social and Economic Integration in Host Communities. Kyiv. 93 p. [in Ukrainian]. URL: https://www.slideshare.net/slideshow/ss-91693812/91693812
33. Kuzmin, V., & Stryzhak, G. (2024). Social consequences of the Russian-Ukrainian war: Adaptation of internally displaced persons in Ukrainian society. Sociopolis: Journal of Social and Political Sciences, 1, 30-37. [in Ukrainian]. URL: https://sociopolis.in.ua/index.php/journal/issue/view/1
34. Niemets, L. M., Husieva, N. V., Pohrebskyi, T. H., Bartosh, O. V., & Lohvynova, M. O. (2020). Integration of Internally Displaced Persons of Ukraine: Realities, Problems, Perspectives. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series Geology. Geography. Ecology, (51), 140–157. DOI: https://doi.org/10.26565/2410-7360-2019-51-10
35. Ukraine. Displacement Tracking Mapping (2025). Global Data Institute. International Organization for Migration. URL: https://dtm.iom.int/ukraine
36. Returning Home from Abroad: Trends, Drivers, and Reintegration Challenges among Ukrainian Returnees from Abroad (2025). Thematic Brief, July 2025. Global Data Institute. International Organization for Migration. URL: https://dtm.iom.int/reports/ukraine-returning-home-abroad-july-2025
37. Internally displaced persons (2025). Information and Computing Center of the Ministry of Social Policy of Ukraine. URL: https://www.ioc.gov.ua/analytics/dashboard-vpo
38. On the Approval of the Methodological Recommendations for Conducting Needs Assessments of Internally Displaced Persons at the Local Community Level (2024). Order of the Ministry for Reintegration of the Temporarily Occupied Territories of Ukraine of 13 September 2024, No. 288. [in Ukrainian]. URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0288925-24#Text
39. Pidgrushnyi, G.P., Koval, K.P., Molnar, Y.Y., & Homoki E. (2017). Ukrainian-Hungarian Borderland: Possibilities and Perspectives of Development in the Context of European Integration Processes. Ukrainian Geographical Journal, 4, 20–30. [in Ukrainian]. DOI: https://doi.org/10.15407/ugz2017.04.020
40. Chuiko, O., & Fedorenko, O. (2020). Levels of Social Integration of Internally Displaced Persons in the Host Community. Regional Formation and Development Studies, 31(2), 7–16. DOI: https://doi.org/10.15181/rfds.v31i2.2093
41. Havryliuk, O. (2022). Spaces of Internal Displacement: Understanding the Hidden Urban Geographies of Armed Conflict in Ukraine. Moravian Geographical Reports, 30(1), 2–21. DOI: https://doi.org/10.2478/mgr-2022-0001
42. Lundgren, M. (2016). Place Matters: Return Intentions among Forcibly Displaced Young Georgians from Abkhazia Living in Tbilisi and Zugdidi. Caucasus Survey, 4(2), 129–148. DOI: https://doi.org/10.1080/23761199.2016.1162569
43. Ryan, D., Dooley B., & Benson C. (2008). Theoretical Perspectives on Post-Migration Adaptation and Psychological Well-Being among Refugees: Towards a Resource-Based Model. Journal of Refugee Studies, 21(1), 1–18. DOI: https://doi.org/10.1093/jrs/fem047
44. Zewude, B. & Siraw, G. (2024). Sustainable Integration of Internally Displaced Persons (IDPs) in Ethiopia: Exploring Intentions about Post-Conflict Resettlement Choices. Cogent Social Sciences, 10(1), 2350116. DOI: https://doi.org/10.1080/23311886.2024.2350116
45. Zongo, S, Ouedraogo, I. & Soma, A. (2024). Internally Displaced Persons and Socio-territorial Integration in the Commune of Kaya in Burkina Faso. A Sustainable Solution Study, 25(4), 21–29. DOI: https://doi.org/10.9734/AIR/2024/v25i41077
46. Ager, A., & Strang, A. (2008). Understanding Integration: A Conceptual Framework. Journal of Refugee Studies, 21(2), 166–191. DOI: https://doi.org/10.1093/jrs/fen016
47. Zavisca, J.R., Mitchneck, B., & Gerber, T.P. (2023). Housing and Integration of Internally Displaced Persons: The Case of Ukraine in 2018. Frontiers in Human Dynamics, 5, 1086064. DOI: https://doi.org/10.3389/fhumd.2023.1086064
48. Oginni, S.O., Opoku, M.P., & Alupo, B.A. (2018). Terrorism in the Lake Chad Region: Integration of Refugees and Internally Displaced Persons. Journal of Borderlands Studies, 35(5), 725–741. DOI: https://doi.org/10.1080/08865655.2018.1457975
49. Aysa-Lastra, M. (2011). Integration of Internally Displaced Persons in Urban Labour Markets: A Case Study of the IDP Population in Soacha, Colombia. Journal of Refugee Studies, 24(2), 277–303. DOI: https://doi.org/10.1093/jrs/feq054
50. Kravchuk, S.L. (2023). Factors of Effective Integration of Internally Displaced Persons into Territorial Communities. Habitus, 49, 193-198. [in Ukrainian]. DOI: https://doi.org/10.32782/2663-5208.2023.49.33
51. Gogishvili, D. & Harris-Brandts, S. (2019). The Social and Spatial Insularity of Internally Displaced Persons: "Neighbourhood Effects" in Georgia's Collective Centres. Caucasus Survey, 7(2), 134–156. DOI: https://doi.org/10.1080/23761199.2019.1617652
52. Regulation on the Council for Internally Displaced Persons under the Berehove District Military Administration (2023). [in Ukrainian]. URL: https://rada.info/upload/users_files/04053708/c65141a3a6705dfbb10c6af0c99b70cb.doc

53. *Strategy for the Integration of Internally Displaced Persons in Berehove District of Zakarpattia Region, until 2030 (2025). [in Ukrainian]. URL: https://bereg-rda.gov.ua/news/1750842316*
54. *Roshchyk, I., Bilan, Y., Krol, V., & Mishchuk, H. (2024). Social Integration of Internally Displaced Persons in Ukraine: Problems and Challenges for Governing Local Communities. Problems and Perspectives in Management, 22(1), 728–740. DOI: https://doi.org/10.21511/ppm.22(1).2024.57*
55. *Elareshi, M., Ziani, A., & Alsridi, H. (2023). The Perceptions of Iraqi Internally Displaced Persons of Social Media Use during War and Conflict. Jurnal Komunikasi: Malaysian Journal of Communication, 39(1), 21–36. DOI: https://doi.org/10.17576/JKMJC-2023-3901-02*
56. *Mancini, T., Sibilla, F., Argiropoulos, D., Rossi, M., & Everri, M. (2019). The Opportunities and Risks of Mobile Phones for Refugees' Experience: A Scoping Review. PLoS ONE, 14(12), e0225684. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225684*
57. *Khan, M.I., & Saleem, N. (2020). Social Media Dependency and Socio-Cultural Integration: Case of Internally Displaced Persons in Pakistan. Pakistan Social Sciences Review, 4(3), 52–65. DOI: http://doi.org/10.35484/pssr.2020(4-III)05*
58. *Mezentsev, K., & Mezentsev, O. (2022). War and the City: Lessons from Urbicide in Ukraine. Czasopismo Geograficzne, 93(3), 495–521. DOI: https://doi.org/10.12657/czageo-93-20*

Тимчасовість vs інтеграція вимушено переміщених осіб в умовах невизначеності: кейс прикордонних територіальних громад Закарпаття

Наталія Провотар [1]
к. геогр. н., доцент, кафедра економічної та соціальної географії,
[1] Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна;
Галина Щука [2]
д. пед. н., професор, кафедра географії та туризму,
[2] Закарпатський угорський університет імені Ференца Ракоці II, Берегове, Україна;
Костянтин Мезенцев [1]
д. геогр. н., професор, кафедра економічної та соціальної географії

Стаття має на меті показати різноманіття локальних особливостей інтеграції ВПО у прикордонні територіальні громади Берегівського району Закарпатської області, проаналізувати наскільки вимушені переселення є тимчасовим явищем в житті приймаючої територіальної громади та чи можуть вони стати ресурсом для її розвитку в умовах невизначеності міграційної поведінки переселенців та стратегії громади щодо їх інтеграції. Дослідження базувалося на опитуванні зареєстрованих ВПО у прикордонних громадах у поєднанні з порівняльним крос-контекстуальним аналізом. Анкета включала тематичні блоки щодо демографії, самооцінки задоволеності ключових потреб (житло, працевлаштування, соціальна допомога, освіта та медичне обслуговування), міграційних намірів ВПО, оцінки діяльності місцевої влади та їх участі у житті громади. Показник участі у житті громади був визначений як основний індикатор інтеграції вимушених переселенців. Дані аналізувалися для виявлення закономірностей задоволеності базових потреб, бар'єрів участі та впливу локальних інституційних і соціокультурних чинників на інтеграцію до приймаючих громад. Результати дослідження виявили, що ВПО відрізняються за готовністю інтегруватися залежно від задоволеності потреб у працевлаштуванні та базових ресурсах, а також від соціо-культурного й інституційного контексту приймаючих громад. Задоволеність працевлаштуванням виявилася ключовим фактором, що сприяє участі, тоді як неформальна зайнятість уповільнює інтеграцію. Задоволеність житлом, хоча й важлива з точки зору добробуту, безпосередньо не визначає участі ВПО у житті громади. Не зважаючи на те, що в останні роки створено інституційні передумови для інтеграції ВПО, фактичне ставлення приймаючої громади до переселенців визначає їхню дієвість. Соціальні мережі та громадські ініціативи були основними каналами соціо-культурної інтеграції. Стан триваючих тимчасовості та незавершеної або відкладеної інтеграції посилює напруженість між переселенцями та приймаючими громадами, які прагнуть більшої визначеності. Інтеграція ВПО є багатовимірним процесом, що поєднує доступ до ресурсів та відкритість приймаючих громад. Локальні особливості на перший погляд подібних сусідніх прикордонних громад значно диференціюють інтегрованість ВПО. Формуються відмінні локальні середовища сприятливості як у доступі до базових ресурсів для інтеграції, так і відкритості мешканців та місцевої влади до нових мешканців, які шукають нової нормальності.

Ключові слова*: внутрішньо переміщені особи, інтеграція ВПО, територіальна громада, залучення, війна, тимчасовість, міграційні наміри, Закарпаття, Україна.*

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу
Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 11 вересня 2025 р.
Прийнята 23 жовтня 2025 р.

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-27
UDC 551.509.324
Received 12 October 2025
Accepted 19 November 2025

Assessment of the reliability of a statistical model for developing a scenario of possible air temperature changes in the spring season over the territory of Azerbaijan

Surkhay Safarov
DSc (Geography), Professor of Department "Aerospace monitoring of environment",
National Aviation Academy, Azerbaijan Airlines JSC, Baku, Azerbaijan,
e-mail: ssafarov@naa.edu.az, https://orcid.org/0009-0003-9330-5240

ABSTRACT

Problem Statement. This study validates statistical estimates of Azerbaijan's mean spring temperatures up to 2022. Although precise long-term forecasts remain difficult, analysis of meteorological data from 1968–2022 demonstrates that statistical methods effectively capture regional spring temperature trends and provide a reliable basis for future climate research and scenario development.

Purpose. The study aims to develop a statistical spectral model that reliably identifies climate-induced changes in meteorological elements, particularly air temperature. The model employs optimized analytical methods whose adequacy is verified through comparisons of observed and calculated temperature series using smoothing techniques, Schuster tests, and correlation analyses. Establishing this model and its optimal application enhances the development of regional climate models and scenarios, improving the reliability of projected climatic trends.

Methods. The methodology is based on analyzing long-term air temperature series, classified into periodic and non-periodic variability indicators, the latter being useful for studying future temperature changes. Given the non-stationary nature of meteorological variables, trends in long-term series are treated as reliable, but series must first be transformed into stationary sequences for analysis using statistical techniques. Extrapolating observed trends beyond a few years is physically unreliable due to natural variability; thus, only anthropogenic trends linked to CO_2 increases are suitable for climate scenario development. Additionally, the length of meteorological records is critical, as classical climatology assumes stationarity and estimation accuracy improves with longer observational series.

Results. Spectral analysis revealed dominant 3-, 5-, and 7–9-year temperature cycles across most of Azerbaijan, while Nakhchivan exhibited only 3- and 9-year cycles. The model showed strong agreement between observed and simulated spring temperatures, with R^2 values of 0.906 (1998–2000), 0.953 (2001–2005), and 0.933 (2006–2010). Error assessment showed that 36–56% of cases had $\Delta T \leq 1°C$, 76–88% had $\Delta T \leq 2°C$, and nearly all cases had $\Delta T \leq 3$–$4°C$. For $\Delta T \leq 2°C$, the forecast accuracy reached 76–94%, confirming the reliability of the proposed spring temperature scenario.

Conclusions. Using a statistical spectral model, a new scenario of spring temperature change for Azerbaijan was developed. Projections recalculated from linear trend equations for 1968–2010 demonstrate higher accuracy compared with earlier approaches, and the post-2023 estimates can be treated as updated climate scenarios, improving the reliability of future assessments. A five-year (2026–2030) averaged spring temperature map for the country's physiographic zones was also compiled. Overall, the model offers a robust and scientifically grounded basis for future spring temperature projections and broader climate-related analyses.

Keywords*: Statistical model, climate change, climate scenario, spring air temperature, periodicity, physiographic zones, model adequacy.*

In cites: Safarov Surkhay (2025). Assessment of the reliability of a statistical model for developing a scenario of possible air temperature changes in the spring season over the territory of Azerbaijan. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 366-381. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-27

Introduction. Current evidence confirms that anthropogenic influence is driving a global-scale warming process in the Earth's atmosphere [4]. This warming is expected to intensify significantly in the coming decades [11]. The facts of modern climate change have been established through analysis of meteorological observation data from the past 165 years (since 1860) using various methods [3, 8].

Research on contemporary global warming reveals that the dynamics of average annual temperatures in the Northern Hemisphere correlate with fluctuations in atmospheric transparency, as well as changes in carbon dioxide and other greenhouse gas concentrations [1; 19]. Consequently, 20th-century climate changes were largely determined by the increasing rate of greenhouse gases, a trend likely to persist in the future [9, 13].

These findings have compelled scientists, business leaders, and policymakers worldwide to recognize climate as a critical natural resource. The uneven distribution of this resource among nations has already led to significant socio-economic and political consequences, as reflected in the demands of international organizations like the UNFCCC (COP) [22, 24].

The resolution of climate change-induced challenges remains a focal point of intensive research within global political, scientific, and economic spheres [17]. Within the framework of international cooperation on climate change adaptation and mitigation measures, the Republic of Azerbaijan signed the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) in 1992 and ratified it in 1995. Over the past 25-30 years, intensive research

© Safarov Surkhay, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

has been conducted in Azerbaijan on various aspects of regional climate change [24].

In this regard, one of the most critical directions in contemporary climate change research involves determining its projected or potential future values. The foundation of such forecasting lies in general atmospheric circulation models, paleoclimate analog methods based on historical climate variations, and statistical prediction methods. The first two approaches successfully employ statistical techniques grounded in instrumental observational data. The evaluation of anticipated future climate changes through these methodologies is formally recognized in scientific literature under the term "climate scenarios" [18].

Some sources note that climate scenarios are not intended for predicting future climate. Therefore, climate scenarios can primarily provide a schematic representation of possible future climatic conditions. They may also serve as a fundamental basis for assessing the impact of potential climate changes on economic sectors [17].

However, it should be noted that most climate change scenarios have been developed for the entire planet or the Northern Hemisphere. Consequently, the most realistic methods for constructing climate change scenarios must undergo refinement and detailing when applied to specific regions and localities.

The statistical spectral models employed in this research are not based on physical mechanisms but are typically developed through analysis of historical meteorological conditions. Furthermore, harmonic analysis is utilized here to model the dynamics of meteorological element time series. A general methodology has been developed for stochastic modeling of meteorological processes, which includes determining the interannual and intra-annual variability of the elements under consideration. The manifestation of climate change in long-term time series may take the form of monotonic variations (trends, etc.) or harmonic oscillations characterizing transitions between stationary states. Harmonic analysis represents the most widely used method for detecting periodic fluctuations [6, 14].

The guidelines for using climate scenarios developed through statistical methods are provided in reference document [21]. Study [2] presents a new statistical approach for detecting and explaining climate change based on additive decomposition and simple hypothesis testing, utilizing maximum likelihood estimation, evaluation and testing procedures. This approach was applied to the linear trend of global mean temperature during 1951-2010, where the observed warming (+0.65 K) is claimed to be primarily associated with anthropogenic influences.

The calculations utilized data from the absolute majority of meteorological stations located in Azerbaijan's territory for the period 1968-2022. These data were obtained from the meteorological database [8, 20]. The mean seasonal air temperature data for 1968-1997 were used to develop the projected spring temperature scenario, while the 1998-2022 data were employed to verify the reliability of the obtained scenario values for the considered parameter.

When developing the spring temperature scenario, preference was given to averaged data across all physiographic zones of the country [12], as this method increases calculation accuracy. In this context, the following physiographic zones of the republic were selected considering synoptic and climatic regionalization: 1. Absheron zone; 2. Lankaran-Astara zone; 3. Kura-Araz lowland; 4. Ganja-Gazakh zone; 5. Northeastern slope of Lesser Caucasus; 6. Southern slope of Greater Caucasus; 7. Shamakhi-Gobustan zone; 8. Northeastern slope of Greater Caucasus; 9. Plain part of Nakhchivan AR; 10. Foothill part of Nakhchivan AR.

Analysis of recent research. The article verifies results obtained through statistical methods to derive some generalized prognostic estimates of multiannual mean spring temperatures for the period up to 2022. It is not possible to produce reliable forecasts for such an extended lead time period. However, through statistical analysis of accumulated data, it is possible to obtain generalized assessments of future climate change trends.

In our previous studies, using statistical methods based on observational data covering the period 1968-1997, we developed scenarios of air temperature variations for different periods (seasonal, annual) in the territory of Azerbaijan for the coming decades. Additionally, we assessed the regional characteristics of projected air temperature indicators up to 2030 [19].

Highlighting previously unsolved parts. In previous studies conducted in the territory of the Republic of Azerbaijan, climate change has been investigated through the dynamics of time series of local climatic elements and their fluctuation characteristics [15]. Such research has examined formation features of atmospheric precipitation across different time periods, regional variations, and spatiotemporal changes. Recent studies have focused more prominently on comparative analyses with various climatic norms [22].

While these investigations have identified impacts of climate change, the expected variations in specific regions remain undetermined to date. Although international climate models provide scenarios based on certain characteristics of time series, they have largely overlooked local climatic features and physiographic conditions. Consequently, this study employs a statistical spectral model to comprehensively analyze spring temperature variations.

The foundation of the research methodology consists of a series of methods comprehensively explained in the text with reference [16, 21].

However, since the climate system's transformation process is non-stationary, there exists uncertainty regarding how long the meteorological time series should be. Therefore, the accuracy of linear extrapolation depends heavily both on the length of the calculation period and on the duration of the linear extrapolation extension. This is because the relationship between past and future weakens over time. This weakening is linked to either the introduction of new factors into the research or changes in the nature of their influence.

Based on this methodology, the determination of the linear trend equation-that is, the selection of the deterministic component and the estimation of its parameters-was implemented using the least squares method. The extrapolation of the linear trend was used to calculate projected annual temperature values ($T_1(t)$) for future periods.

To compute the stochastic component of the temperature series, spectral analysis was employed to identify the periodicities of short- and long-phase fluctuations within the series. The influence of the calculation period length on these computations was accounted for using the harmonic weighting method.

Then, the values calculated by the trend equation were subtracted from the general series to obtain the temperature residuals. Subsequently, using Schuster and periodicity methods, the projected temperature values ($T_2(\mathbf{t})$) were computed. It should be noted that the temperature series may also contain an uncorrelated random component ($T_3(t)$). Following these procedures, the overall trend of projected air temperature values was calculated as the sum of these temperatures:

$$T(t) = T_1(t) + T_2(t) + T_3(t). \quad (1)$$

Let us examine the components of equation (1). First, we note that averaging uncorrelated random variables $Y_3(t)$ over a sufficiently long series yields values approaching zero [21]. The equation represents the linear trend of the multiannual temperature series.

$$Y_1(t) = A_T \cdot t + B_T. \quad (2)$$

The temperature residual values calculated by equation (3):

$$Y_2(t) = A_0 + A_1 \cdot sin\left(\frac{2\pi}{t_1} + \phi_1\right) + A_2 \cdot sin\left(\frac{2\pi}{t_2} + \phi_2\right) + A_3 \cdot sin\left(\frac{2\pi}{t_3} + \phi_3\right), \quad (3)$$

where,

$$A_0 = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} T_k = \overline{T}, A_m = \sqrt{a_m^2 + b_m^2}, \ \ m = 1,2,3. \quad (4)$$

$$a_m = \frac{2}{t_m} \cdot \overline{T} \cdot cos\frac{2\pi}{t_m}\tau, b_m = \frac{2}{t_m} \cdot \overline{T} \cdot sin\frac{2\pi}{t_m}\tau, \phi_m = arctg\frac{a_m}{b_m}, \ \ m = 1,2,3. \quad (5)$$

where, $\boldsymbol{\tau}$ - serial number of years; $\bar{\boldsymbol{T}}$ - mean multiannual temperature; t_1, t_2, t_3- represent values of short-, medium-, and long-phase fluctuations in the temperature residual series, respectively.

Let us note that presenting the temperature residual series as the sum of three components is related to accounting for short, medium, and long-phase fluctuations. In this case, t_1, t_2, and t_3 must not be divisible by each other and should not be in adjacent positions describing the same cycle. Fulfilling these specified conditions is crucial. The calculation procedure for them is provided in [19].

Consequently, to develop and prepare the air temperature variation scenario, the values obtained through the linear trend are summed with the extrapolated values of the multiannual series residuals.

$$T_c = A_T \cdot \tau + B_T + T_2(t). \quad (6)$$

The computational experiments conducted based on spectral analysis of time series of mean spring temperature residuals have demonstrated that the optimal approach involves utilizing a combination of 3, 5, and 7-9 year cycles. However, in the Nakhchivan, only a combination of 3 and 9-year cycles was employed [20].

To evaluate the quality of the proposed model, the correlation coefficient between actual and calculated values of mean spring temperatures was computed [25]. Table 1 presents some statistical characteristics of the linear trend:

$r(T_f,T_{1h})$ - correlation coefficient between actual air temperature (T_f) and temperature calculated based on linear trend (T_{1h});

$r(T_f,T_{1h})$ - correlation coefficient between the actual air temperature (T_f) and the temperature represented as the sum of the linear trend and multiannual series harmonic residuals $r(T_f,T_{2h})$;

A_T and B_T - coefficients of equation (6) for the 1968-1997 time interval.

Table 1 shows that the values of $r(T_f,T_{1h})$ indicate a long-term negative trend in spring temperature series during 1968-1997 across all zones except Ganja-Gazakh and Lankaran-Astara. Generally, the rate of temperature change is low, as confirmed by the small values of the linear trend and coefficient A_T.

The application of equation (6) for estimations significantly improved the statistical relationship between calculated and actual series of this element, meaning the calculated values better approximate the observed values. The correlation coefficients $r(T_f, T_{2h})$ range between 0.39-0.64. These results are further corroborated by the graphical data pre-

Table 1

Statistical characteristics of linear trends for spring temperature series

Physiographic Zones	$r(T_f,T_{1h})$	$r(T_f, T_{2h})$	A_T	B_T
Absheron	-0.18	0.45	-0.02	11.7
Lankaran-Astara	0.01	0.44	-0.00	12.5
Kura-Araz lowland	-0.03	0.44	0.00	13.6
Ganja-Gazakh	0.06	0.44	0.01	12.1
Northeastern slope of Lesser Caucasus	-0.07	0.42	-0.01	5.8
Southern slope of Greater Caucasus	-0.06	0.44	-0.01	-0.01
Shamakhi-Gobustan	-0.22	0.50	-0.03	-0.03
Northeastern slope of Greater Caucasus	-0.11	0.44	-0.01	-0.01
Plain part of Nakhchivan	-0.16	0.51	-0.02	-0.02
Foothill part of Nakhchivan	-0.29	0.64	-0.04	-0.04

sented in Figures 1 (a, b, c, d, e, f, g, h, s, t).

The graphs in the figures display the projected annual values of mean spring temperature, while Table 2 provides the five-year averaged projected values. These data indicate relatively minor temperature variations from one five-year period to another.

Verification of model adequacy. Verification of model adequacy involves validating the long-term seasonal air temperature scenario over periods ranging from 1 to 33 years, specifically examining the degree of agreement between predicted spring temperatures and actual observed values. Naturally, as the forecast period lengthens, this agreement diminishes [26]. The problems of multiannual and long-term forecasting of various meteorological elements represent sufficiently complex scientific tasks. It is also indicated here that the accuracy of such forecasts still remains at a relatively low level. In addressing these issues, synoptic and physical-statistical methods are being increasingly utilized.

According to the World Meteorological Organization, short-term weather forecasts with 85-90% accuracy and long-term forecasts with 60-65% accuracy are considered successful [18]. In this study, the following statistical criteria were used to verify the model's adequacy:

1. The correlation coefficient between calculated and actual air temperature values;
2. Mean Absolute Error (MAE):

$$MAE = \frac{1}{N} \cdot (T_{fi} - T_{hi})$$

3. Root Mean Square Error (RMSE):

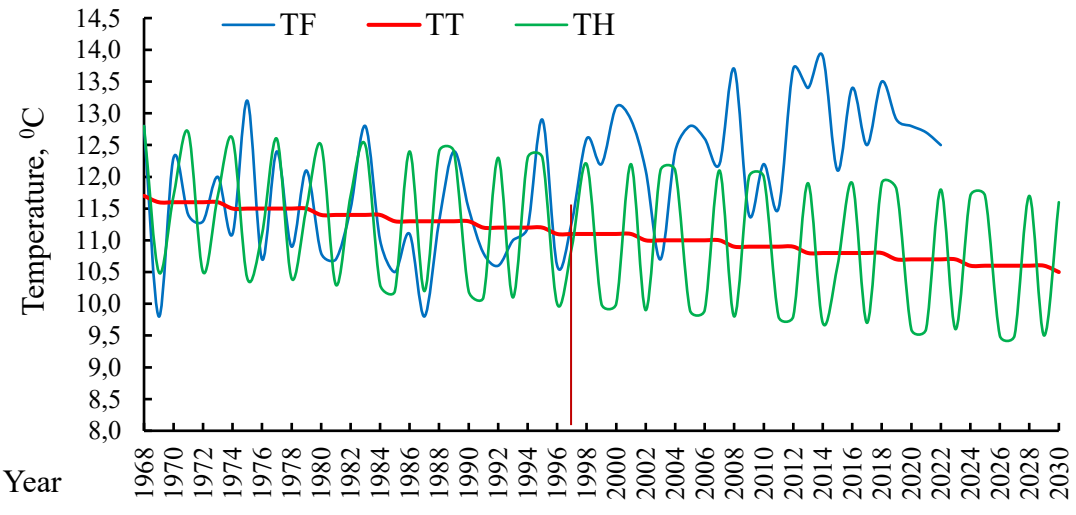
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \left(\sum_{i=1}^{N} (T_{fi} - T_{hi})^2\right)}$$

Here, T_{fi} - actual value of spring temperature by year; T_{hi} - calculated value of spring temperature by year; N - represents the length of the calculation period.

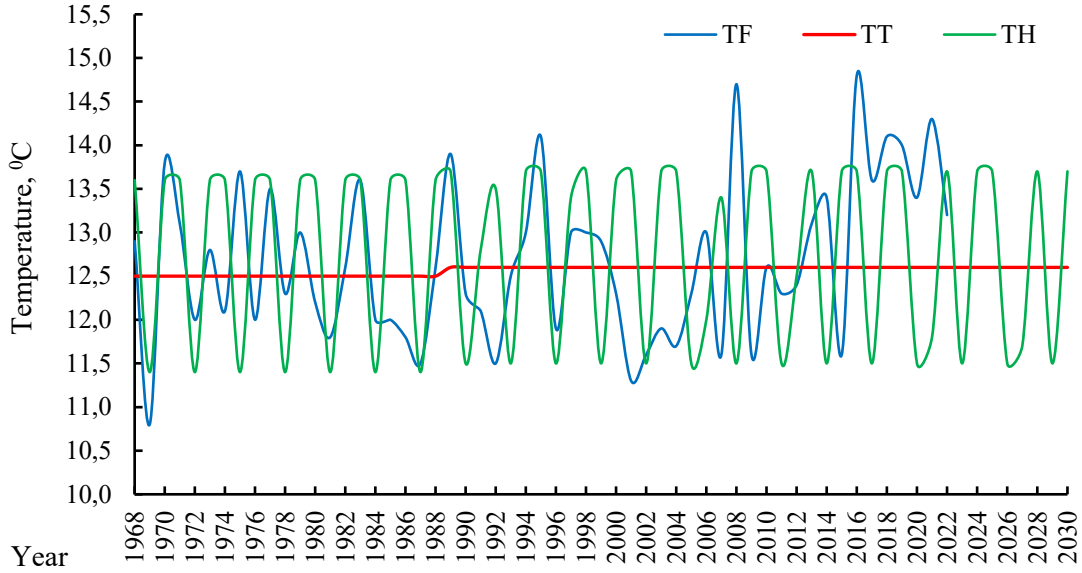
The study also utilized specified absolute error criteria ($\Delta T \leq 1.0°C$; $\Delta T \leq 2.0°C$; $\Delta T \leq 3.0°C$; $\Delta T \leq 4.0°C$) for validating the model forecast of mean daily air temperature [14] to assess the reliability of the developed scenario (long-term forecast).

The above results employed two scenario variants to assess potential temperature changes in the summer season up to 2030:

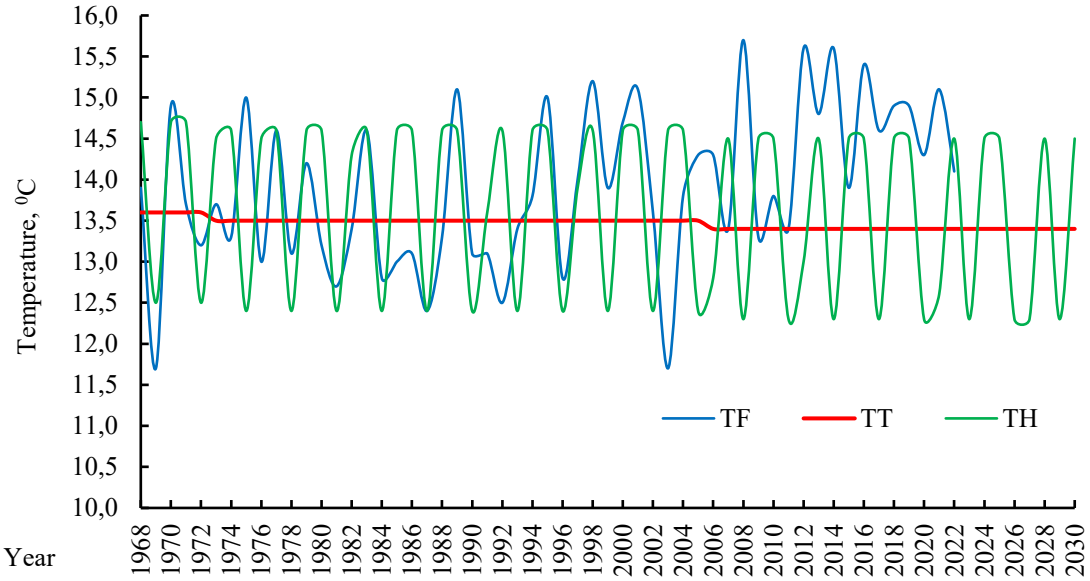
1. Temperature variations averaged over five-year periods, presented in tabular form;
2. Projected annual dynamics of this element's values through 2030. In this case, the analysis incorporated the hypothesis that extrapolation



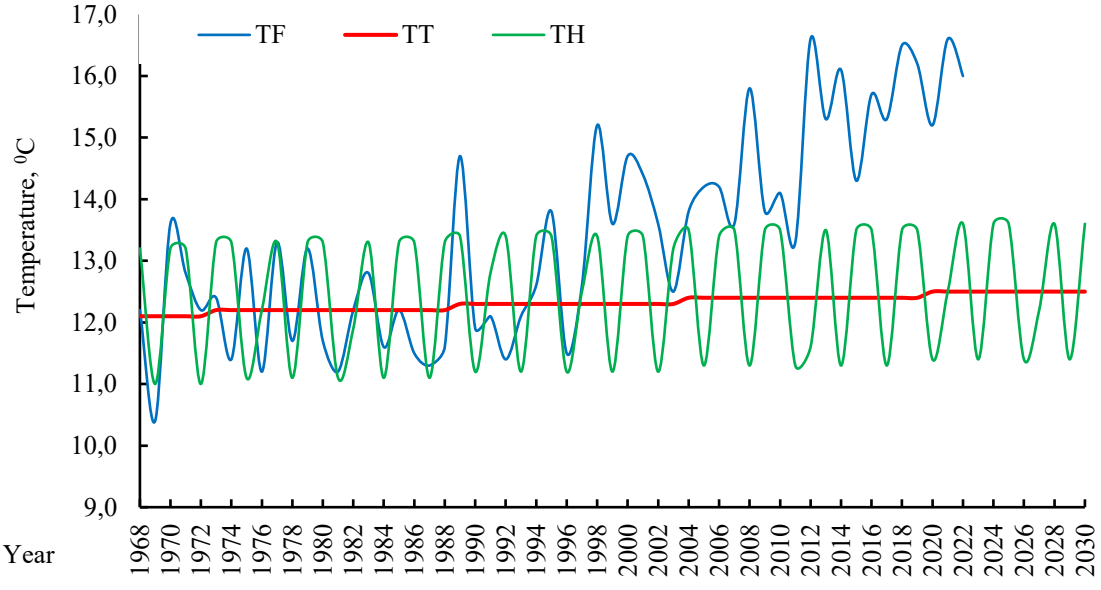
a)


TF
TT
TH
Temperature, ⁰C
Year

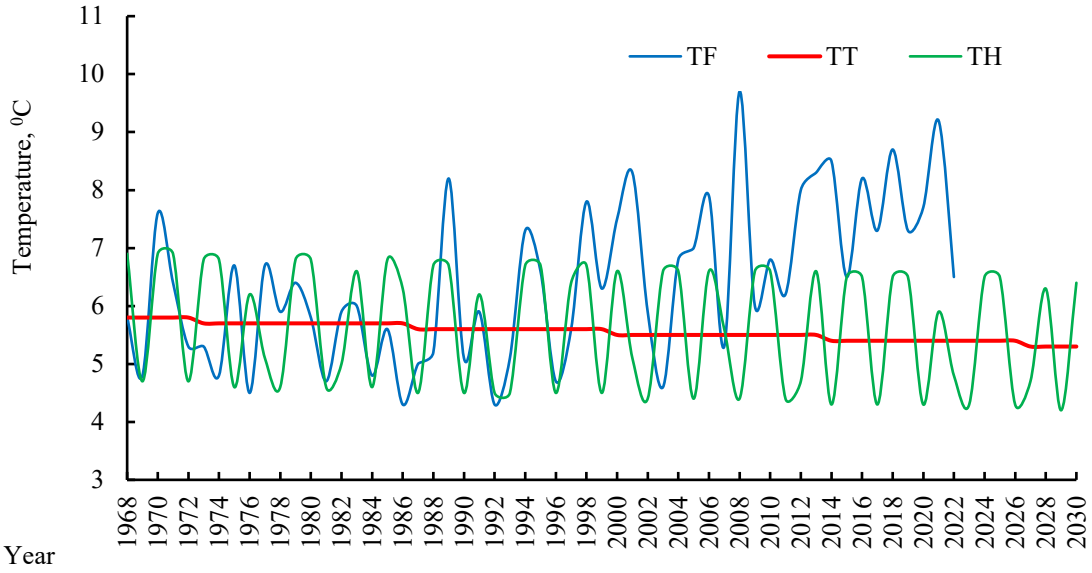
b)


TF
TT
TH
Temperature, ⁰C
Year

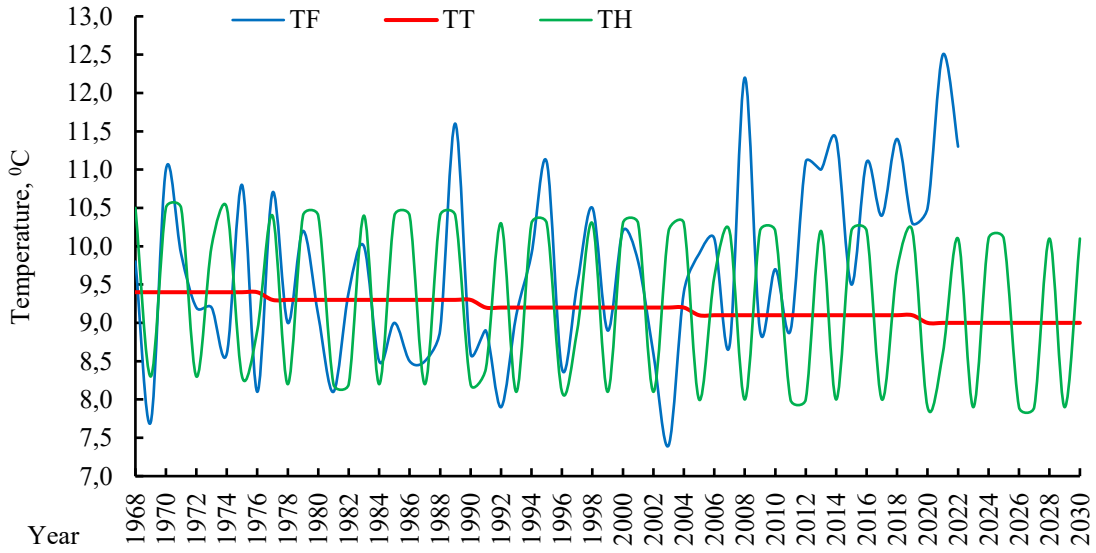
c)


TF
TT
TH
Temperature, ⁰C
Year

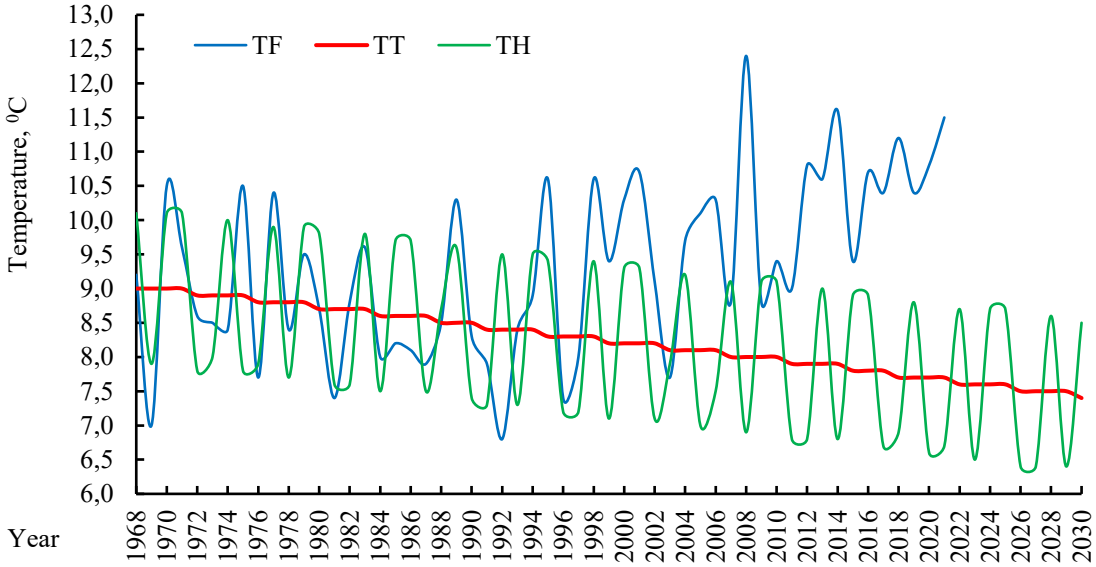
d)


TF
TT
TH
Temperature, ⁰C
Year

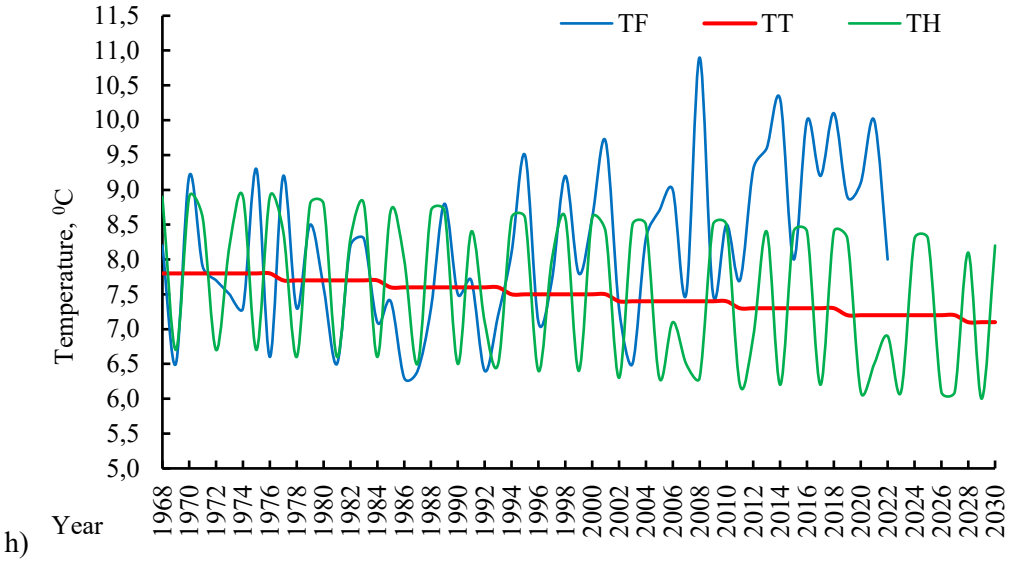
e)


TF
TT
TH
Temperature, ⁰C
Year

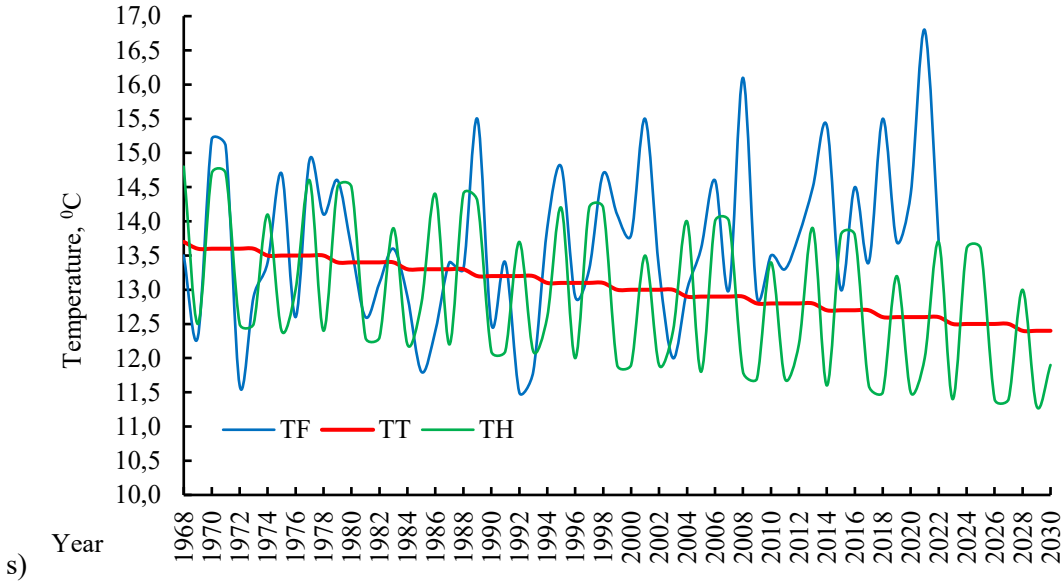
f)


TF
TT
TH
Temperature, ⁰C
Year

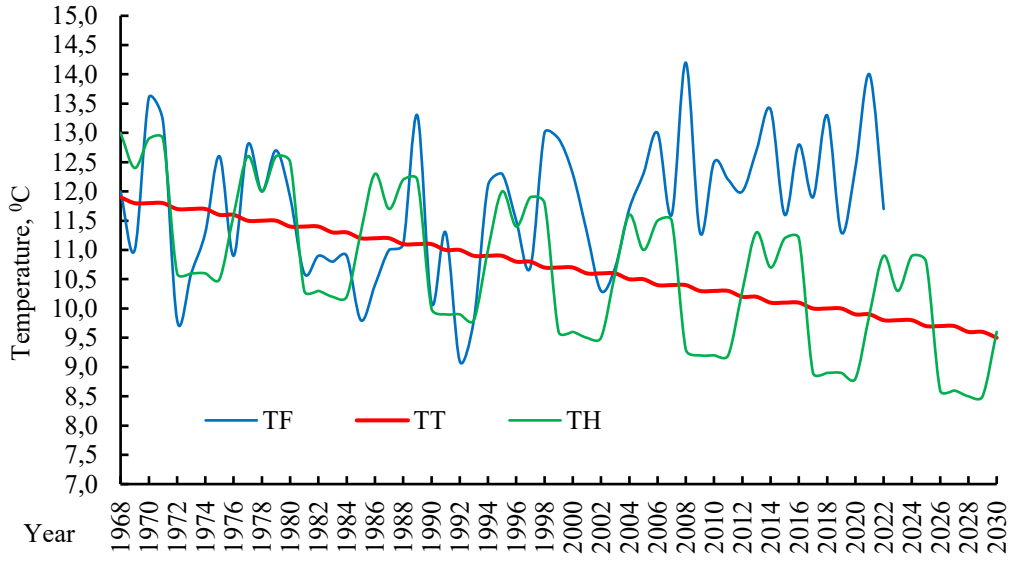
g)



h)



s)



t)

Fig. 1. Multiannual dynamics of actual (TF), calculated (TH) and linear trend (TT) values of spring air temperature for Absheron (a), Lankaran-Astara (b), Kura-Araz lowland (c), Ganja-Gazakh (d), northeastern slope of Lesser Caucasus (e), southern slope of Greater Caucasus (f), Shamakhi-Gobustan (g), northeastern slope of Greater Caucasus (h), plain area of Nakhchivan (s) and foothill area of Nakhchivan (t) (1968-1997)

Table 2

Scenario of projected mean spring temperature values in Azerbaijan for 2001-2030

Physiographic Zones	Five-year periods					
	2001-2005	2006-2010	2011-2015	2016-2020	2021-2025	2026-2030
Absheron	11.2	11.2	10.4	11.0	10.9	10.4
Lankaran-Astara	12.8	12.9	12.6	12.8	12.9	12.4
Kura-Araz lowland	13.7	13.7	13.3	13.6	13.7	13.2
Ganja-Gazakh	12.5	13.0	12.2	12.6	12.9	12.4
Northeastern slope of Lesser Caucasus	5.4	6.0	5.3	5.6	5.6	5.2
Southern slope of Greater Caucasus	9.4	9.6	8.9	9.2	9.4	8.8
Shamakhi-Gobustan	8.1	8.3	7.7	7.6	7.9	7.3
Northeastern slope of Greater Caucasus	7.6	7.4	7.2	7.5	7.2	6.9
Plain part of Nakhchivan	12.7	13.0	12.6	12.3	12.9	11.8
Foothill part of Nakhchivan	10.4	10.1	10.5	9.3	10.6	8.8

of the anthropogenic trend in air temperature changes -linked to the proportional annual increase of CO_2 - can be considered feasible [5; 23; 27].

The materials not included in the model's implementation (1998-2022) were used to verify the reliability of the research results. By utilizing five-year averaged temperature variations, the projected temperature values were compared with their actual values to test the model. The averaging was performed for the following climatic periods: 1998-2000; 2001-2005; 2006-2010; 2011-2015; 2016-2020; 2021-2022. The obtained results are presented in Table 3 and Figures 1 ((a, b, c, d, e, f, g, h, s, t).

Table 3

Averaged values of calculated (T_h) and observed (T_f) indicators of mean spring temperature across various physiographic zones by climatic periods

Physiographic Zones	1998-2000		2001-2005		2006-2010		2011-2015		2016-2020		2021-2022	
	T_h	T_f	T_h	T_f	T_h	T_f	T_h	T_f	T_h	T_f	T_h	T_f
Absheron	10.7	12.6	11.2	12.2	11.2	12.4	10.4	12.9	11.0	13.0	10.7	12.6
Lankaran-Astara	12.9	12.7	12.8	12.8	12.9	12.9	12.6	12.6	12.8	12.8	12.8	13.7
Kura-Araz lowland	13.9	14.6	13.7	13.7	13.7	14.1	13.3	14.6	13.6	14.8	13.6	14.6
Ganja-Gazakh	12.7	14.5	12.5	13.7	13.0	14.3	12.2	15.1	12.6	15.8	13.0	16.3
Northeastern slope of Lesser Caucasus	5.9	7.2	5.4	6.5	6.0	7.1	5.3	7.5	5.6	7.8	5.4	7.8
Southern slope of Greater Caucasus	9.6	9.9	9.4	9.0	9.6	9.9	8.9	10.4	9.2	10.7	9.4	11.9
Shamakhi-Gobustan	8.6	10.1	8.1	9.4	8.3	9.9	7.7	10.3	7.6	10.7	7.7	10.7
Northeastern slope of Greater Caucasus	7.9	8.5	7.6	8.1	7.4	8.8	7.2	9.0	7.5	9.5	6.7	9.0
Plain part of Nakhchivan	12.7	14.2	12.7	13.5	13.0	14.0	12.6	14.0	12.3	14.3	12.9	15.2
Foothill part of Nakhchivan	10.3	12.7	10.4	11.3	10.1	12.5	10.5	12.4	9.3	12.3	10.4	12.8
R^2	0.906		0.953		0.933		0.906		0.870		0.932	

The evaluation results revealed significant agreement between calculated and actual spring temperature values, particularly during the 1998-2010 period. As shown in Table 3, the model's reliability metric (R^2) for the climatic periods of 1998-2000, 2001-2005, and 2006-2010 was 0.906, 0.953, and 0.933, respectively. In the subsequent two periods, these values decreased, while showing a relative increase for the 2021-2022 timeframe. For temperature calculations, the model employed linear trend equations derived from the 1968-2010 period.

During the 1998-2000 period, the difference between actual and calculated spring temperature values was positive across all physiographic zones except Lankaran-Astara, ranging between 0.3-2.4°C. During the 2001-2005 period, the difference between actual and calculated spring temperature values remained positive across all physiographic zones except the southern slope of Greater Caucasus [7], stabilizing within a range of 0.0-1.2°C.

During the 2006-2010 period the difference between actual and calculated spring temperature val-

ues was positive ranging between 0.0-2.4°C across physiographic zones these differences fluctuated within intervals of 0.0-2.9°C during 2011-2015 0.0-3.2°C during 2016-2020 and 0.9-3.3°C during 2021-2022 the mean absolute errors (MAE) of calculations were around 1.5-2.2°C while root mean square errors (RMSE) ranged between 1.6-2.7°C.

Partially observable from Table 4 across all zones and climatic periods the average calculations show 7-13 cases (28-52 % of total cases) with absolute errors ΔT≤ 1.0°C 12-19 cases (48-76 %) ΔT≤ 2.0°C 17-24 cases (68-96 %) ΔT≤ 3.0°C and 20-25 cases (80-100 %) ΔT≤ 4.0°C. As with others the model utilized linear trend equations derived from the 1968-1997 period for temperature calculations.

The analysis reveals that beginning approximately in 2011, the discrepancy between observed and modeled spring temperature values started increasing significantly compared to previous periods. This shift primarily resulted from a transition to a pronounced warming trend in spring temperatures commencing around 2011, as clearly evidenced by the data presented in Figures 1 (a, b, c, d, e, f, g, h, s, t). The graphical representations demonstrate marked upward deviations in actual temperature dynamics during this period. Consequently, while the model outputs demonstrate higher reliability for the 1998-2010 timeframe, these findings necessitate methodological refinements for subsequent periods to enhance predictive accuracy.

Table 4

Performance indicators of the model scenario for mean spring temperature (^{0}C)

Physiographic Zones	MAE	RMSE	Guarantee level of scenario at specified absolute error values, %			
			ΔT≤ 1.0	ΔT≤ 2.0	ΔT≤ 3.0	ΔT≤ 4.0
Absheron	1.9	2.2	28	56	76	96
Lankaran-Astara	1.4	1.6	40	76	96	100
Kura-Araz lowland	1.4	1.7	44	76	92	100
Ganja-Gazakh	2.2	2.7	32	48	76	84
Northeastern slope of Lesser Caucasus	1.9	2.3	28	64	72	88
Southern slope of Greater Caucasus	1.5	1.9	52	72	84	96
Shamakhi-Gobustan	2.2	2.7	28	56	68	80
Northeastern slope of Greater Caucasus	1.7	2.0	36	72	88	92
Plain part of Nakhchivan	1.7	2.1	44	76	84	92
Foothill part of Nakhchivan	2.1	2.5	24	52	76	88

For refining the scenario projections of spring temperatures across Azerbaijan's diverse natural-climatic zones, the 1968-2010 period was examined as the observational baseline, with corresponding recalculations performed to redefine the linear trend equations.

As evident from Table 1, the multiannual spring temperature series during 1968-1997 exhibited a decreasing trend in most physiographic zones except Lankaran-Astara and Ganja-Gazakh. This declining tendency is identified through negative correlation coefficients of the linear trend equations.

Analysis of the multiannual spring temperature series for 1968-2010 reveals a persistent positive trend. This warming pattern is evidenced by positive correlation coefficients of the linear trends, with temperature increases across most physiographic zones demonstrating statistical significance [7, 10].

The correlation coefficients of the linear trend were -0.51 for Absheron zone, -0.26 for Lankaran-Astara zone, -0.42 for Kura-Araz lowland, -0.78 for Ganja-Gazakh zone, -0.56 for northeastern slope of Lesser Caucasus, -0.41 for southern slope of Greater Caucasus, 0.50 for Shamakhi-Gobustan zone, 0.46 for northeastern slope of Greater Caucasus, -0.26 for plain part of Nakhchivan AR and -0.30 for foothill part of Nakhchivan AR.

The averaged values of calculated (T_h) and observed (T_f) mean spring temperature indicators across various physiographic zones of the republic for different climatic periods are presented in Table 5. The model temperatures were calculated using linear trend equations derived from the 1968-2010 period [8, 25].

During the 1998-2000 period the difference between actual and calculated spring temperature values was positive ranging between 0.0-1.5°C across physiographic zones For subsequent periods these differences fluctuated within -0.7 to +0.2°C during 2001-2005, -0.2 to +1.0°C during 2006-2010, 0.2-1.1°C during 2011-2015, 0.2-1.9°C during 2016-2020 and 0.2-1.1°C during 2021-2022.

Table 5

Averaged values of calculated (T_h) and observed (T_f) indicators of mean spring temperature across physiographic zones by climatic periods

Physiographic Zones	1998-2000		2001-2005		2006-2010		2011-2015		2016-2020		2021-2022	
	T_h	T_f	T_h	T_f	T_h	T_f	T_h	T_f	T_h	T_f	T_h	T_f
Absheron	11.5	12.6	12.2	12.2	12.3	12.4	11.8	12.9	12.6	13.0	12.4	12.6
Lankaran-Astara	12.8	12.7	12.6	12.8	12.7	12.9	12.4	12.6	12.6	12.8	12.5	13.7
Kura-Araz lowland	14.2	14.6	14.1	13.7	14.2	14.1	13.9	14.6	14.3	14.8	14.3	14.6
Ganja-Gazakh	13.7	14.5	13.8	13.7	14.5	14.3	14.0	15.1	14.7	15.8	15.3	16.3
Northeastern slope of Lesser Caucasus	6.7	7.2	6.4	6.5	7.2	7.1	6.7	7.5	7.3	7.8	7.1	7.8
Southern slope of Greater Caucasus	9.9	9.9	9.7	9.0	10.0	9.9	9.4	10.4	9.7	10.7	10.0	11.9
Shamakhi-Gobustan	9.6	10.1	9.3	9.4	9.8	9.9	9.4	10.3	9.6	10.7	9.9	10.7
Northeastern slope of Greater Caucasus	8.5	8.5	8.3	8.1	8.3	8.8	8.3	9.0	8.7	9.5	8.0	9.0
Plain part of Nakhchivan	13.1	14.2	13.3	13.5	13.7	14.0	13.5	14.0	13.3	14.3	13.9	15.2
Foothill part of Nakhchivan	11.2	12.7	11.6	11.3	11.5	12.5	12.1	12.4	11.2	12.3	12.4	12.8
R^2	0.960		0.987		0.979		0.985		0.982		0.964	

Table 5 shows that during the 1998-2000, 2001-2005 and 2006-2010 climatic periods the model's reliability metric (R^2) was 0.960, 0.987 and 0.979 respectively In the subsequent three periods these values remained very high at 0.985, 0.982 and 0.964 respectively. The mean absolute errors (MAE) of calculations ranged between 1.2-1.4°C while root mean square errors (RMSE) were within 1.5-1.7°C.

A comparative analysis of these indicators with corresponding values in Table 4 demonstrates that when using linear trend equations derived from the 1968-2010 period for temperature calculations, both the mean absolute error and root mean square error were significantly reduced. This confirms the necessity for progressive refinement of prognostic values over time.

Table 6 shows that partially across all zones and climatic periods on average 9-14 cases (36-56% of total cases) had absolute calculation errors $\Delta T \leq 10°C$, 19-22 cases (76-88%) $\Delta T \leq 20°C$, 22-25 cases (88-100%) $\Delta T \leq 30°C$, and 24-25 cases (96-100%) $\Delta T \leq 40°C$. Here the model utilized linear trend equations derived from the 1968-2010 period for temperature calculations.

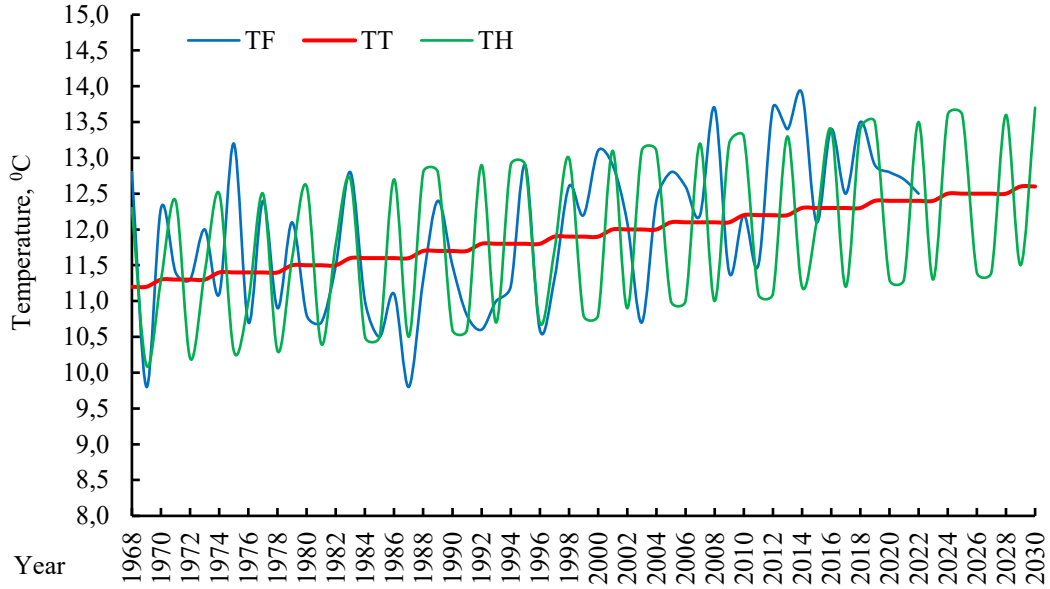
Table 6

Performance indicators of the model scenario for mean spring temperature

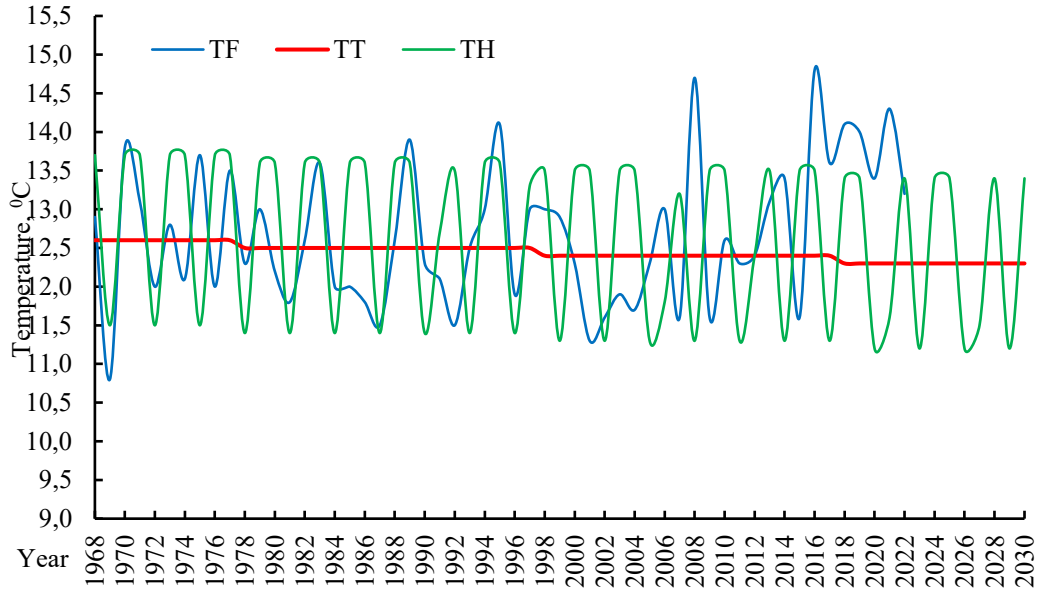
Physiographic Zones	MAE	RMSE	Guarantee level of scenario at specified absolute error values, %			
			$\Delta T \leq 1.0$	$\Delta T \leq 2.0$	$\Delta T \leq 3.0$	$\Delta T \leq 4.0$
Absheron	1.2	1.5	44	80	100	100
Lankaran-Astara	1.4	1.6	40	76	96	100
Kura-Araz lowland	1.2	1.5	36	88	96	100
Ganja-Gazakh	1.2	1.5	48	88	96	100
Northeastern slope of Lesser Caucasus	1.3	1.6	48	84	96	96
Southern slope of Greater Caucasus	1.3	1.7	48	80	88	100
Shamakhi-Gobustan	1.4	1.7	40	76	92	100
Northeastern slope of Greater Caucasus	1.2	1.5	56	84	96	100
Plain part of Nakhchivan	1.3	1.7	52	84	92	100
Foothill part of Nakhchivan	1.2	1.5	40	84	96	100

As previously noted, according to the WMO, long-term forecasts with 60-65% accuracy are considered successful [22; 28]. Based on this, it can be stated that the spring temperature variation scenario developed using the proposed model is adequate, as its accuracy already ranges between 76-94% for $\Delta T \leq 2.0°C$.

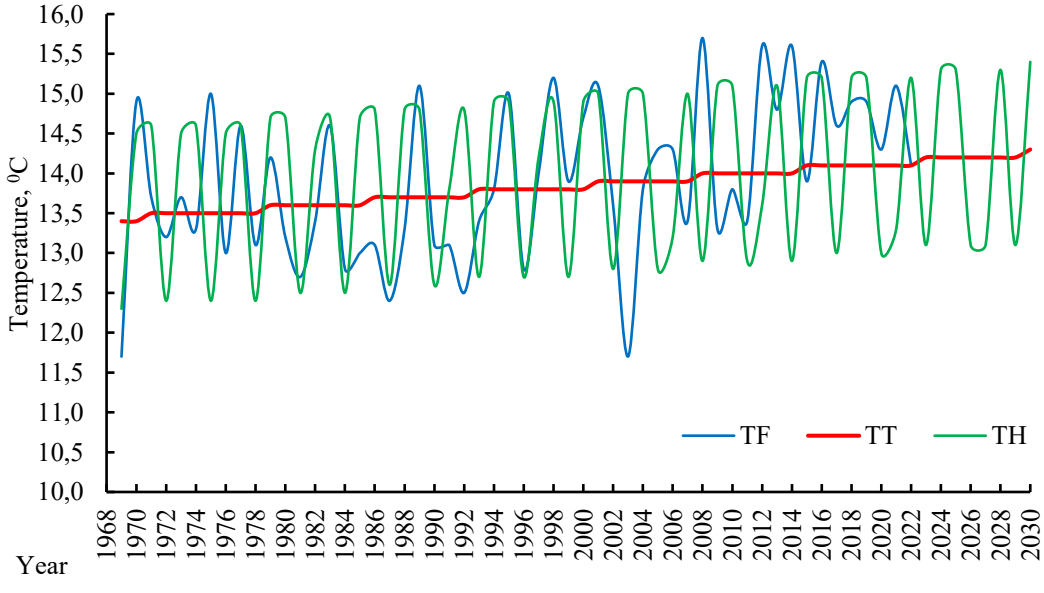
The recalculated projections of future spring temperature values are presented in Figure 2. The model utilized linear trend equations derived from


TF
TT
TH
Temperature, ⁰C
Year

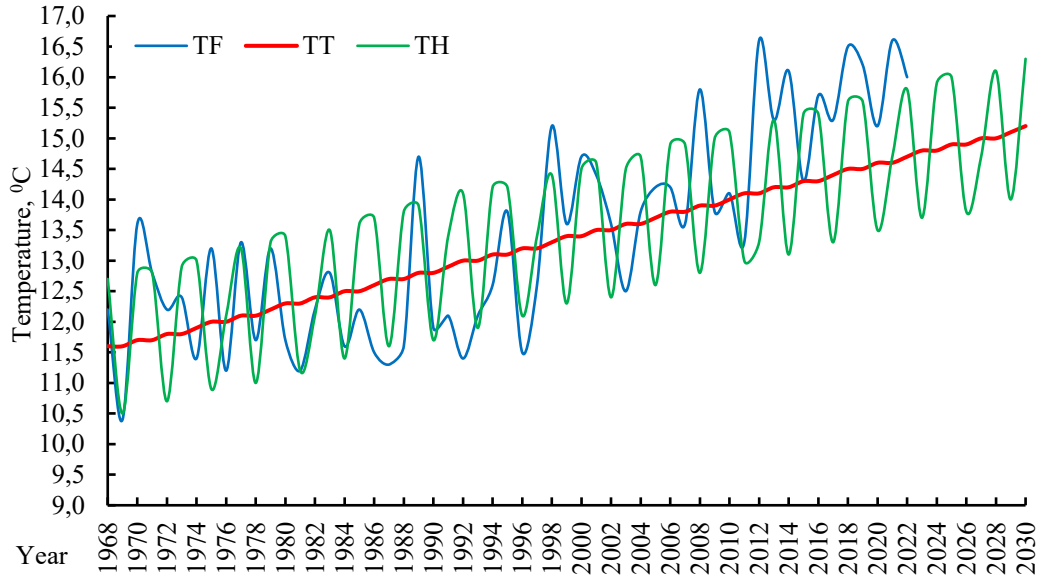
a)


TF
TT
TH
Temperature, ⁰C
Year

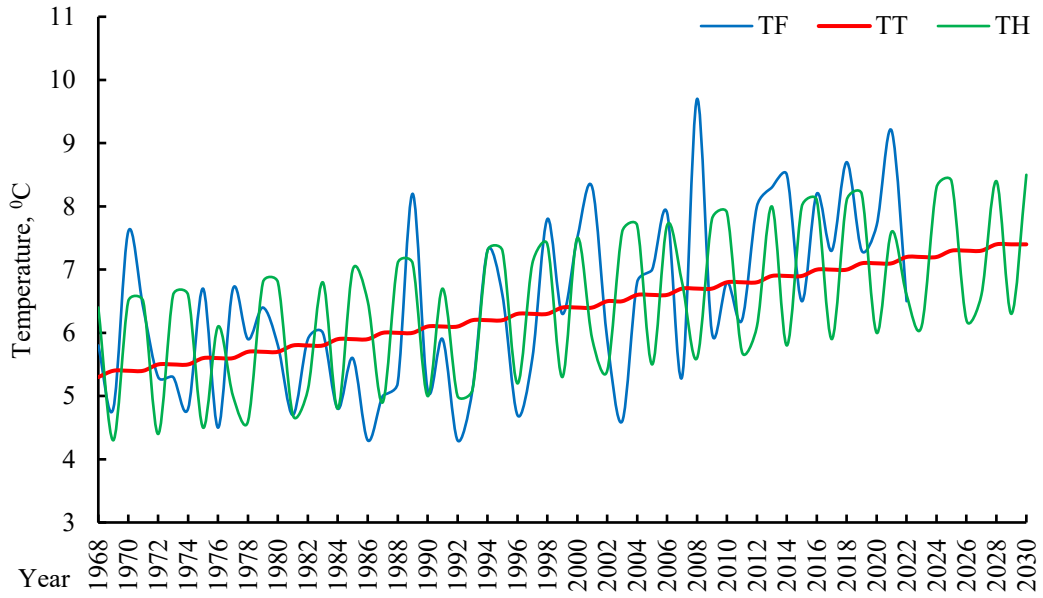
b)


TF
TT
TH
Temperature, ⁰C
Year

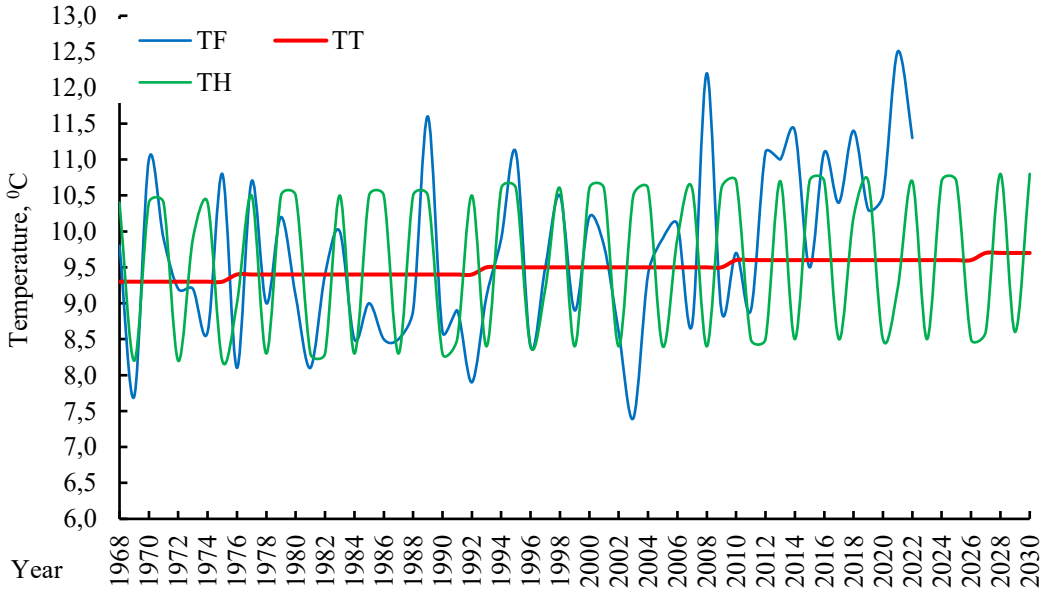
c)


TF
TT
TH
Temperature, ^{0}C
Year

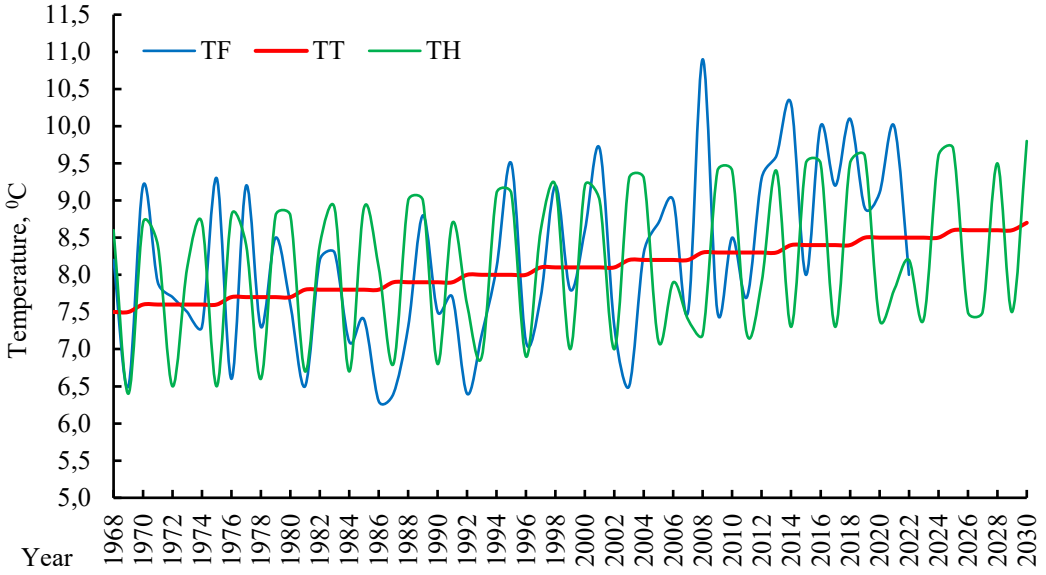
d)


TF
TT
TH
Temperature, ^{0}C
Year

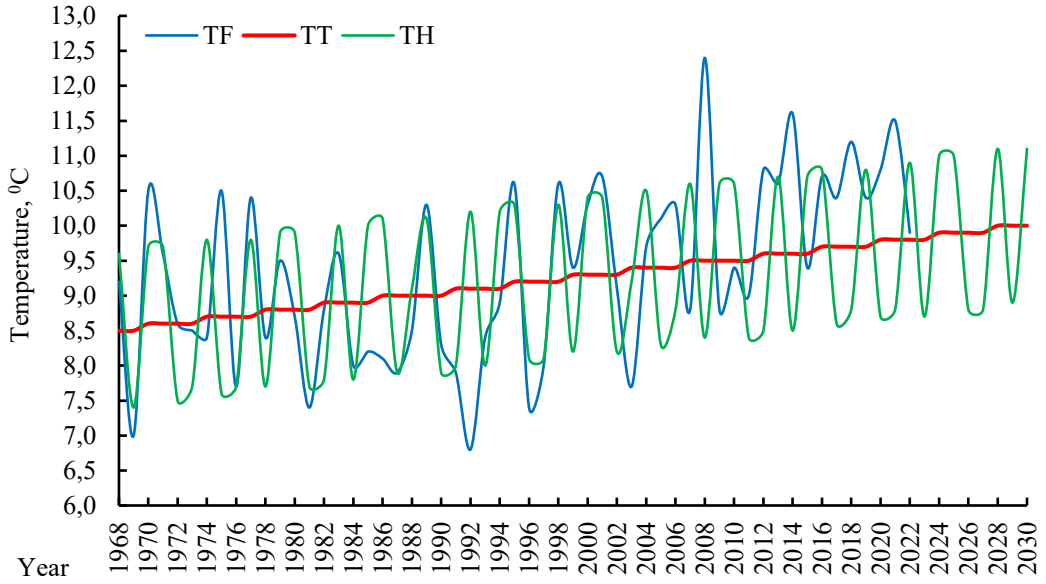
e)


TF
TT
TH
Temperature, ^{0}C
Year

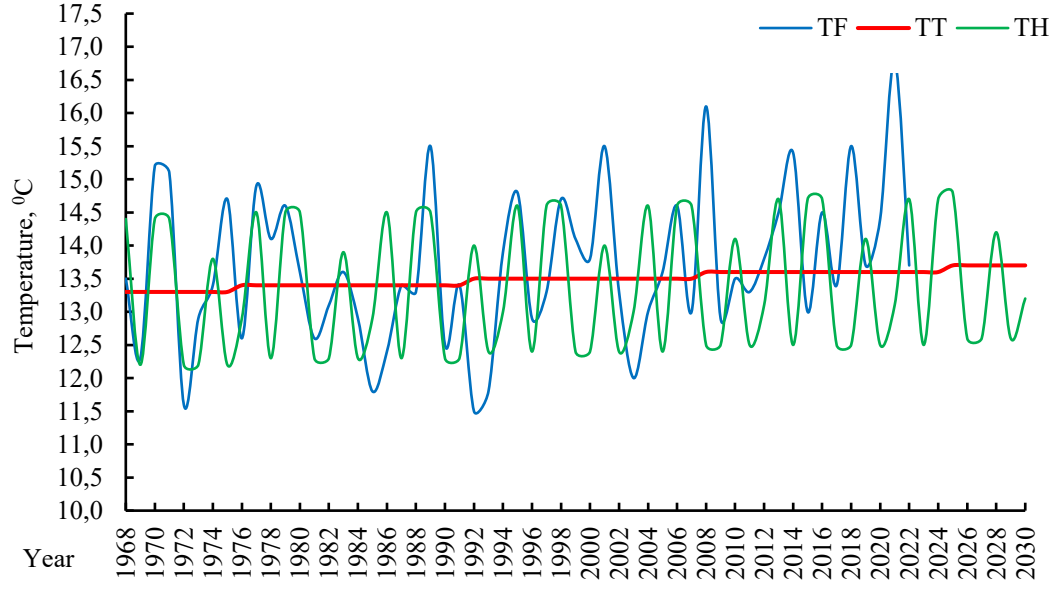
f)


TF
TT
TH
Temperature, ⁰C
Year

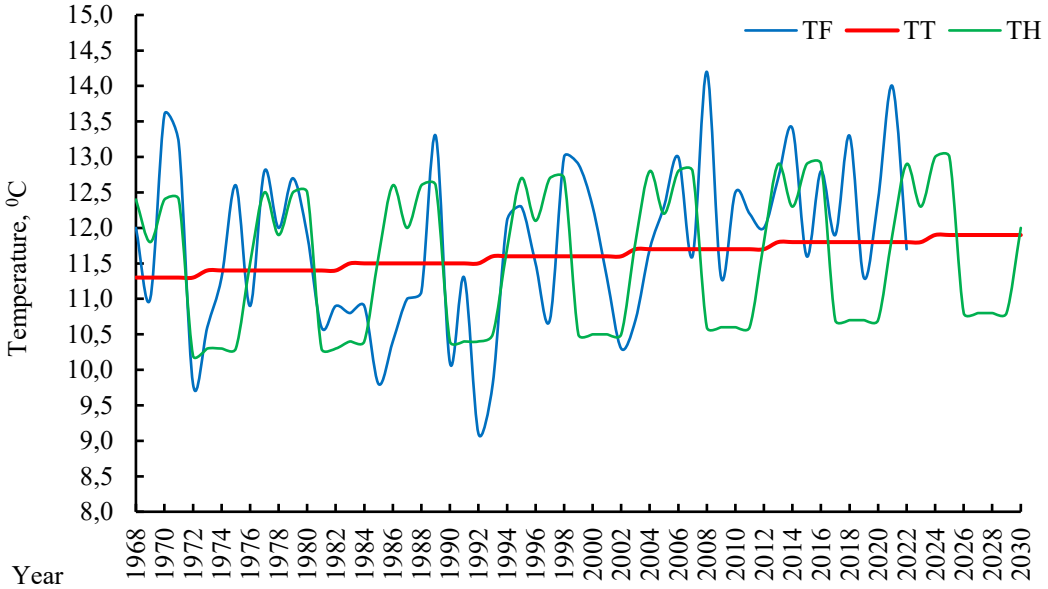
g)


TF
TT
TH
Temperature, ⁰C
Year

h)


TF
TT
TH
Temperature, ⁰C
Year

i)



j)

Fig. 2. Multiannual dynamics of actual (TF), calculated (TH) and linear trend (TT) values of spring air temperature for Absheron (a), Lankaran-Astara (b), Kura-Araz lowland (c), Ganja-Gazakh (d), northeastern slope of Lesser Caucasus (e), southern slope of Greater Caucasus (f), Shamakhi-Gobustan (g), northeastern slope of Greater Caucasus (h), plain area of Nakhchivan (s) and foothill area of Nakhchivan (t) (1968-2010)

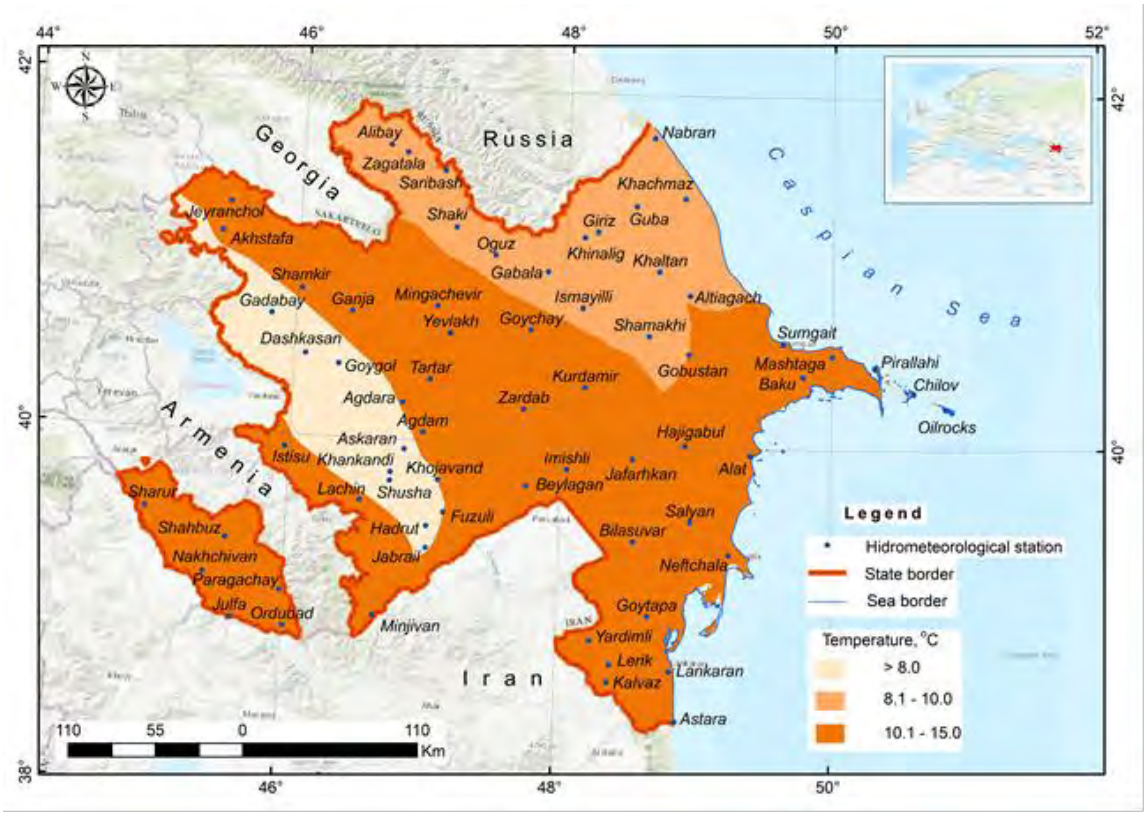


Fig. 3. Spatial distribution map of five-year averaged spring temperature prognostic/scenario values across physiographic zones (2026-2030)

the 1968-2010 period for temperature calculations.

A comparative analysis with corresponding graphs in Figure 2 demonstrates significant refinements in the annual projections of mean spring temperature. For post-2023 values in Figure 2, it is more appropriate to consider the calculated values as new scenarios.

Alongside the data presented in these graphs, Figure 3 provides a spatial distribution map of five-year averaged (2026-2030) prognostic/scenario spring temperature values across Azerbaijan's physiographic zones.

References

1. *Angela, M. Z., Timothy, I. M., Nikku, M. (2013). An investigation of a super-Earth exoplanet with a greenhouse-gas atmosphere using a general circulation model. Icarus, 226 (2), 1743-1761. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2012.12.019*
2. *Aurelien, R., Francis, W. Z., Jean, M. A., Philippe, N. (2017). A new statistical approach to climate change detection and attribution. Springer Nature Link: Climate Dynamics, 48, 367-386. https://doi.org/10.1007/s00382-016-3079-6*
3. *Brohan, P., Kennedy, J.J., Harris, I., Tett, S.F.B., Jones P.D. (2006). Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 111, 48-65. https://doi.org/10.1029/2005JD006548*
4. *Chilingar, G.V., Sorokhtin, O. G., Khilyuk, L., Gorfunkel, M. V. (2009). Greenhouse gases and greenhouse effect. Springer, Environmental Geology, 58, 1207-1213. https://doi.org/10.1007/s00254-008-1615-3*
5. *Hansen, G., Stone, D. (2016). Assessing the observed impact of anthropogenic climate change. Nature, Climate Change, 6, 532-537. https://doi.org/10.1038/nclimate2896*
6. *Hoffmann, P., Krueger, O., Schlunzen, K. H. (2011). A statistical model for the urban heat island and its application to a climate change scenario. International Journal of Climatology. 1-11. https://doi.org/10.1002/joc.2348*
7. *Huseynov, J.S., Tagiyev, A.Sh., Balammadov, Sh.R. (2024). Characteristics of air temperature on the southern and southeastern slopes of the Greater Caucasus in the modern period. Journal of Geology, Geography and Geoecology. 33(3), 475-484. https://doi.org/10.15421/112444*
8. *Huseynov, N.Sh., Huseynov, C.S. (2024). Climate of Azerbaijan: Temperature regime of the air. Baku: Optimist, 267.*
9. *Huseynov, J.S., Tagiyev, A.Sh. (2024). The changes of the air temperature characteristics in the Azerbaijan territory during global climate changes period. Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Geology. 3 (106). 76-82. https://doi.org/10.17721/1728-2713.106.10*
10. *Huseynov, J.S., Huseynova, T.M., Tagiyev, A.Sh. (2025). Assessment of the impact of climate changes on the quality of life of the population in the Greater Caucasus region of the Republic of Azerbaijan. Journal of Geology, Geography and Geoecology. 34(1), 100-111. https://doi.org/10.15421/112510*
11. *Ismayılov, R., Suleymanov, F. (2024). Water resilience under climate change in Azerbaijan. Geojournal of Tourism and Geosites, 53 (2), 677-686. https://doi.org/10.30892/gtg.53231-1243*
12. *Geography of the Republic of Azerbaijan. Ed. R.M. Mammadov. (2015). Baku: Europe, 1: Physical Geography. 530.*
13. *Khalilov, I., Eminov, F. (2024). Against the background of global climate changes, the current ecological situation of Azerbaijan's water resources and the directions of efficient use. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology, Geography, Ecology", (61), 392-398. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-31*
14. *Ming, X., Liang, Q., Xia, X., Li, D., Fowler, H.J. (2020). Real-Time Flood Forecasting Based on a High-Performance 2-D Hydrodynamic Model and Numerical Weather Predictions. AGU: Water Resources Research, vol. 56 (7), 1-22. https://doi.org/10.1029/2019WR025583*
15. *National Atlas of the Republic of Azerbaijan. (2014). Ed. by M.N. Mammadov. Baku: State Land and Cartography Committee, 444.*
16. *Polevoy, A.N. (1988). Applied modeling and forecasting of crop productivity. L. Hidrometeoizdat, 1988. 319.*
17. *Polishchuk, L. B., Reshetchenko, S. I., Cherkashyna, N. I. (2019). Identification of climate changes based on antropogenic transformation of landscapes. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series Geology. Geography. Ecology, (50), 168-177. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2019-50-13*
18. *Troccoli, A., Harrison, A., Anderson, D.L. T., Mason, S.J. (2008). Seasonal Climate: Forecasting and Managing Risk, Springer, NAIV, 82, 411-467. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6992-5*
19. *Safarov, S.H. (2000). The modern tendency of air temperature and precipitation changes in Azerbaijan. Baku: Elm, 300.*
20. *Safarov, S.H. (2002). The main stages of creating the meteorological information database at Azgoskomhidromet. Proceedings of VNIIGMI-MCD, 170, 230-239.*
21. *Vrac, M., Stein, M. L., Hayhoe, K., Liang, X.Z. (2007). A general method for validating statistical downscaling methods under future climate change. Geophysical Research Letters. 34 (18), 87-83. https://doi.org/10.1029/2007GL030295*
22. *WMO-No 1203 (2017). WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals. In Purpose. Chairperson, Publications Board World Meteorological Organization (WMO), Geneva, Switzerland.*
23. *Zhao, F., Zeng, N. (2014). Continued increase in atmospheric CO2 seasonal amplitude in the 21st century projected by the CMIP5 Earth system models. Earth Syst. Dynam., 5 (2), 423-439. https://doi.org/10.5194/esd-5-423-2014*
24. *Available at: www.ipcc.ch*
25. *Available at: www.stat.gov.az*
26. *Available at: http://vcgms.ru/eshhe-raz-o-prognozah-pogody-i-ih-opravdy-vaemosti/*
27. *Available at: https://ru.euronews.com/green/2024/09/06/summer-2024-is-the-hottest-on-record-making-it-likely-this-will-be-the-hottest-year-ever*
28. *Available at: https://www.noaa.gov/news/2024-was-worlds-warmest-year-on-record?utm_source*

Оцінка надійності статистичної моделі для розробки сценарію можливих змін температури повітря у весняний сезон над територією Азербайджану

Сурхай Сафаров
д. геогр. н., професор кафедри
«Аерокосмічний моніторинг навколишнього середовища»,
Національна авіаційна академія,
АТ «Азербайджанські авіалінії», Баку, Азербайджан,

Це дослідження перевіряє статистичні оцінки середніх весняних температур в Азербайджані до 2022 року. Хоча точні довгострокові прогнози залишаються складними, аналіз метеорологічних даних за 1968–2022 роки демонструє, що статистичні методи ефективно фіксують регіональні тенденції весняної температури та забезпечують надійну основу для майбутніх кліматичних досліджень та розробки сценаріїв. Метою дослідження є розробка статистичної спектральної моделі, яка надійно ідентифікує кліматично-індуковані зміни метеорологічних елементів, зокрема температури повітря. Модель використовує оптимізовані аналітичні методи, адекватність яких перевіряється шляхом порівняння спостережуваних та розрахованих температурних рядів з використанням методів згладжування, тестів Шустера та кореляційного аналізу. Створення цієї моделі та її оптимальне застосування сприяє розвитку регіональних кліматичних моделей та сценаріїв, підвищуючи надійність прогнозованих кліматичних тенденцій. Методологія базується на аналізі довгострокових рядів температури повітря, класифікованих на періодичні та неперіодичні показники мінливості, останні корисні для вивчення майбутніх змін температури. Враховуючи нестаціонарний характер метеорологічних змінних, тенденції в довгострокових рядах розглядаються як надійні, але ряди спочатку необхідно перетворити на стаціонарні послідовності для аналізу за допомогою статистичних методів. Екстраполяція спостережуваних тенденцій на період понад кілька років є фізично ненадійною через природну мінливість; таким чином, лише антропогенні тенденції, пов'язані зі збільшенням CO_2, підходять для розробки кліматичних сценаріїв. Крім того, тривалість метеорологічних записів є критично важливою, оскільки класична кліматологія припускає стаціонарність, а точність оцінки покращується з довшими серіями спостережень. За допомогою статистичної спектральної моделі було розроблено новий сценарій зміни весняної температури для Азербайджану. Прогнози, перераховані з лінійних рівнянь тренду для 1968–2010 років, демонструють вищу точність порівняно з попередніми підходами, а оцінки після 2023 року можна розглядати як оновлені кліматичні сценарії, що підвищує надійність майбутніх оцінок. Також було складено п'ятирічну (2026–2030 роки) карту усереднених весняних температур для фізико-географічних зон країни. Загалом, модель пропонує надійну та науково обґрунтовану основу для майбутніх прогнозів весняної температури та ширших аналізів, пов'язаних з кліматом.

Ключові слова*: Статистична модель, зміна клімату, кліматичний сценарій, весняна температура повітря, періодичність, фізико-географічні зони, адекватність моделі.*

Надійшла 12 жовтня 2025 р.
Прийнята 19 листопада 2025 р.

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-28
UDC 910.1:[37.017:502.15](100+477)
Received 20 April 2025
Accepted 17 October 2025

Integrating Sustainable Development into Geographical Education: From Global Perspectives to the Case of Ukraine

Kateryna Sehida [1]
DSc (Geography), Professor, Head of the K. Niemets Department of Human Geography and Regional Studies, [1] V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: kateryna.sehida@karazin.ua, https://orcid.org/0000-0002-1122-8460;
Carla Sofia Santos Ferreira [2]
PhD, Applied Research Institute, Research Centre for Natural Resources Environment and Society (CERNAS), [2] Polytechnic Institute of Coimbra, Bencanta, Coimbra, Portugal,
e-mail: carla.ferreira@ipc.pt, https://orcid.org/0000-0003-3709-4103;
Nataliia Husieva [1]
PhD (Geography), Associate Professor of the K. Niemets Department of Human Geography and Regional Studies,
e-mail: nataliya.guseva@karazin.ua, https://orcid.org/0000-0002-3620-1213;
Kateryna Kravchenko [1]
PhD (Geography), Associate Professor of the K. Niemets Department of Human Geography and Regional Studies,
e-mail: kateryna.kravchenko@karazin.ua, https://orcid.org/0000-0003-4654-3185;
Liudmyla Kliuchko [1]
PhD (Geography), Associate Professor of the K. Niemets Department of Human Geography and Regional Studies,
e-mail: ludmila.klychko@karazin.ua, https://orcid.org/0000-0001-6937-3364;
Hanna Kucheriava [3]
PhD (Geography), Dean of the Faculty of Tourism, Business, and Psychology, [3] Kyiv National Linguistic University, Kyiv, Ukraine,
e-mail: hanna.kucheriava@knlu.edu.ua, https://orcid.org/0000-0002-1742-0605;
Olha Suptelo [1]
PhD (Earth Sciences), Associate Professor of the K. Niemets Department of Human Geography and Regional Studies,
e-mail: olha.suptelo@karazin.ua, https://orcid.org/0000-0003-2901-8565
Ievgeniia Telebienieva [1]
PhD (Geography), Associate Professor of the K. Niemets Department of Human Geography and Regional Studies,
e-mail: eugene.telebeneva@karazin.ua, https://orcid.org/0000-0002-7013-8836;

ABSTRACT

Today society is facing a number of very acute problems unable to be solved even in the developed world. Problems are especially acute in interaction of the system "society - economy - nature". Global transformations taking place in society, related to overcoming systemic crises and contradictions as well as transition of humanity to a new way of civilizational development require evolution of sustainable development policies and strategies for education. Geography should be the core, the basis of the educational standard of education for sustainable development, because geography is interdisciplinary in nature and includes knowledge, concepts, competencies about nature and society, their interaction is pretty much important. Taking into account current trends in reforming the education system in Ukraine, including the higher education, the uncertain place of geography in the knowledge system require finding ways to transform educational programs and curricula with increased practical training and emphasis on formation of competencies in demand for the labor market. This requires use of a comprehensive interdisciplinary approach.

This article aims to identify the key features of ESD globally, and in particular, in Ukraine, by analyzing literature that address and substantiate ESD-related issues. It highlights best international practices in this field, examines the potential of geographical education for SD, and outlines the role of geographical education at all levels of the education system – particularly in higher education in Ukraine - from a sustainable perspective. Additionally, the study explores the implementation of educational programs within Ukraine´s free economic education system, identifying both existing opportunities and challenges. The focus on Ukraine is particularly relevant due to the transformation of its education system, shifting toward European integration.

Results. This study examines ESD in Ukraine through global forum analyses and best practices worldwide. It identifies the potential of geographical education in promoting SD and evaluates the implementation of educational programs in Ukraine. Furthermore, it underscores the importance of social geography, whose methodologies align with ESD needs. Geography, as an interdisciplinary and sustainability-focused science, offers significant potential for ESD. The school geography curriculum already incorporates key SD principles, but their full realization requires diverse teaching methods and teacher engagement. In Ukraine's higher education,

© Sehida Kateryna, Santos Ferreira Carla Sofia, Husieva Nataliia, Kravchenko Kateryna, Kliuchko Liudmyla, Kucheriava Hanna, Suptelo Olha, Telebienieva Ievgeniia, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

geography should be recognized as a core discipline across all specialties, aligning with international ESD standards. Education, as the largest social system shaping public consciousness, must embed sustainability values beyond formal education to drive ethical and sociocultural progress. Ignoring sustainability in education risks perpetuating unresolved global, regional, and local issues. In Ukraine's higher geographical education, defining its role, improving curricula, and strengthening human-geographical education based on sustainability principles should be a research priority.

***Keywords**: education for sustainable development, goals and objectives of sustainable development, geographical education, human geography, educational competencies for sustainable development, education system, educational programs, Ukraine.*

In cites: Sehida Kateryna, Santos Ferreira Carla Sofia, Husieva Nataliia, Kravchenko Kateryna, Kliuchko Liudmyla, Kucheriava Hanna, Suptelo Olha, Telebienieva Ievgeniia (2025). Integrating Sustainable Development into Geographical Education: From Global Perspectives to the Case of Ukraine. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 382-397. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-28

Introduction

In the 21st century, global society faces several pressing challenges that cannot be resolved in isolation, even by the most developed countries. These global issues, impacting both natural and social subsystems across the planet, are escalating at a rapid pace. The challenges are particularly pronounced at the intersection of social, economic and natural systems. The environment is rapidly losing its ability to self-regulate and restore balance across its subsystems, which have been disrupted by human activities. This imbalance is evident in climate change and the increasing frequency of natural disasters worldwide (Evans et al., 2021, Kalantari et al., 2023). Amid these environmental challenges, socio-economic problems are worsening, manifesting as poverty, hunger, terrorism, and escalating armed conflicts. Many of these crises stem from disputes over natural resources, employment opportunities, demographic shifts, and other critical factors. The ecological condition of the natural environment of many regions of the planet is rapidly deteriorating, causing negative effects on human health (Kalantari et al., 2023). Humans, as integral components of global society, are at the core of these issues and the negative changes affecting the Earth. Their increasing demands are incompatible with the planet's biosphere's capacity to sustain them. Human survival depends on constant interaction with the natural environment and the consumption of its resources, creating a complex system of direct and reciprocal relationships. Without effective solutions to these challenges, the planet risks irreversible damage and potential collapse (Evans et al., 2021). is rapidly approaching this critical limit, a topic that is consistently discussed at the highest levels and draws the attention of the global community (UNITED NATIONS, 1972; Botkin et al.,1979; United Nations, 1987; United Nations, 1992a, 1992b;Elias, 2003; Statement by the Ministers of the Environment…, 2003; UNECE, 2005;UNDP, 2015; United Nations, 2015; UNESCO, 2016; United Nations, Economic and Social Council, 2019; Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine, 2017; Club of Rome, 2021; UNDP, 2024).

Therefore, humanity, as a global society, must rethink its priorities, reassess its needs, and adopt limitations where necessary. Sustainable existence and development are impossible without continuous interaction with the environment, fostering environmental awareness, and shaping a global mindset within the "Human-Society-Nature" system. We are talking about developing educational foundations for sustainable development (SD). It must be proactive, widespread in different regions of the world and supported by all countries. Such education must provide knowledge, form practical skills, competencies for existence in the global system "Human-Society-Nature". The current education system remains predominantly human-centric and must shift toward nature-centric principles, embracing an anticipatory approach. This transformation must be integrated at all educational levels to foster environmentally conscious generations capable of addressing the challenges of sustainability (Potocki et al, 2023). As an interdisciplinary field, geography has potential to provide a comprehensive understanding of the Earth's landscapes, considering both natural and socio-geographical features. It fosters spatial thinking and enhances awareness of the interactions between society and the environment, playing a crucial role in sustainable resource management. The geographical component of education is fundamental in shaping knowledge, skills, attitudes and practices aligned with the goals of sustainable development. It equips individuals to make informed decisions that ensure the survival and well-being of both present and future generations (Niemets, 2023). In many countries of the world, such as Ukraine, Niger, Ethiopia, the challenge of providing quality education for sustainable development remains pressing and unresolved. However, integrating geographical education into sustainability initiatives addresses modern challenges, contributes to global sustainability efforts, improves quality of life, and promotes the harmonious coexistence of humans and nature.

Considering the above, several questions remain open: what are the origins of educational concepts for sustainable development (SD)? What is significance and content of quality education as one of the 17 Sustainable Development Goals (SDGs) for 2030? What are the key aspects of implementing and advancing education for sustainable development (ESD)? How

can geographical science contribute to ESD? And what is the potential, content, and significance of geographical ESD in Ukraine?

This article aims to identify the key features of ESD globally, and in particular, in Ukraine, by analyzing both scientific and grey (e.g. global forum and conference documents, educational programs and documents) literature that address and substantiate ESD-related issues. It highlights best international practices in this field, examines the potential of geographical education for SD, and outlines the role of geographical education at all levels of the education system – particularly in higher education in Ukraine - from a sustainable perspective. Additionally, the study explores the implementation of educational programs within Ukraine´s free economic education system, identifying both existing opportunities and challenges. The focus on Ukraine is particularly relevant due to the transformation of its education system, shifting toward European integration.

The origins of educational concepts for sustainable development. The 20th century faced increasing challenges in the interaction between society and nature, prompting global efforts to address environmental issues. Various countries intensified nature protection measures, and the establishment of the United Nations and the Club of Rome marked the beginning of systematic research into long-term environmental and socio-economic challenges (Figures 1, 2).

A major milestone was the 1992 Earth Summit

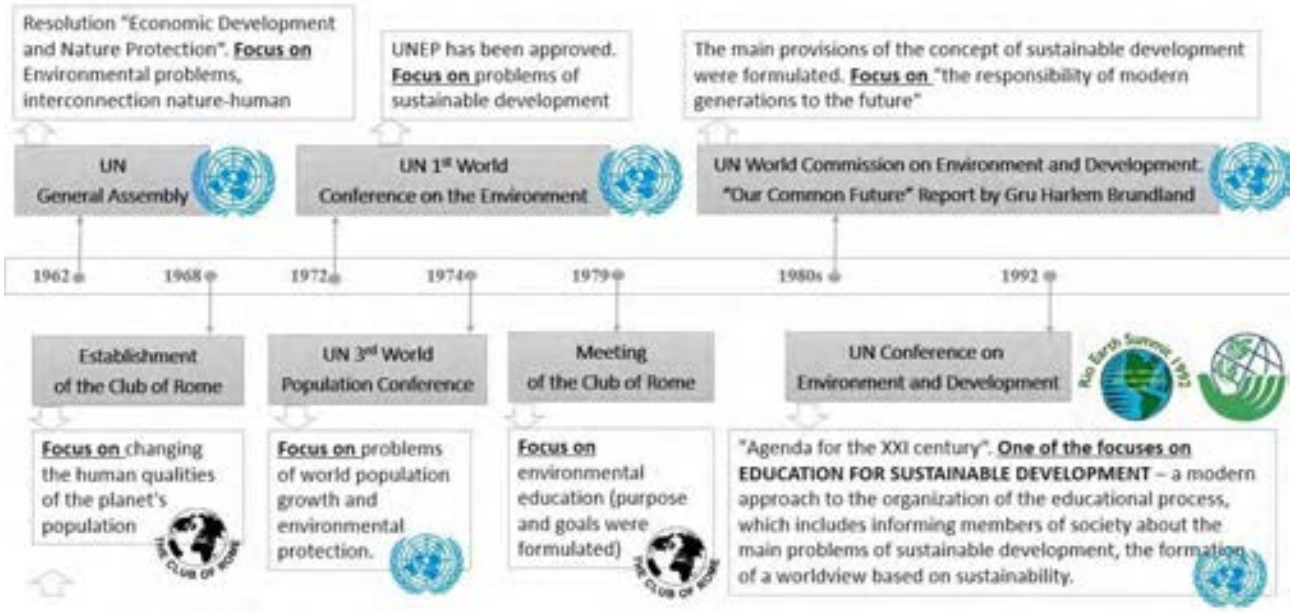


Fig. 1. Origins of ideas for sustainable development education XX (compiled by the authors according UNITED NATIONS, 1972; Botkinet al.,1979; Our Common Future, 1989; United Nations, 1992a, 1992b; Elias, 2003; Statement by the Ministers of the Environment…, 2003; UNECE, 2005;UNDP, 2015; United Nations, 2015; Education 2030. Incheon Declaration…, 2016; Long-term strategy for the Convention until 2030; Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine, 2017; Club of Rome, 2021; http://hdr.undp.org/en/global-reports)

in Rio de Janeiro, where the Agenda 21 was adopted, emphasizing the crucial role of education in promoting sustainable development (United Nations, 1992a). This spurred global discussions on ESD (United Nations, 1992b). In 1993, the EU Maastricht Treaty introduced the concept of a "European dimension in education," highlighting the need for environmental knowledge, practical skills, and competencies for sustainability. As the concept of sustainable development gained global traction, education emerged as a key factor in shaping a new quality of life and economic progress. Higher education, in particular, was recognized as fundamental to national security, economic stability, and overall well-being.

The current concept of ESD is based on the Belgrade Charter (UNESCO, 1975), the Tbilisi Declaration (UNESCO and UNEP, 1977), the University Charter for Sustainable Development (Copernicus - The University Charter…), and the Saloniki Declaration (UNESCO-EPD, 1997). In 2000, the United Nations (UN) Millennium Declaration, signed by 189 states and governments, set out eight Millennium Development Goals (MDGs), including Goal #2: Universal Primary Education, aiming to provide full primary education for all children. In 2002, the UN General Assembly unanimously adopted a resolution "On the UN Decade of ESD", which further solidified education as a foundation for sustainable societies. It emphasized the integration of sustainability principles into education at all levels, and strengthened international cooperation in developing innovative educational policies and practices. The 2015 UN

Summit on Sustainable Development in New York, with participation from 193 countries, resulted in the adoption of the Agenda 2030, outlining 17 Sustainable Development Goals (SDGs) (United Nations, 2024). Among them, Goal #4 aims to provide inclusive, equitable, and quality education while promoting lifelong learning opportunities. At the 2015 UNESCO General Conference in Paris, world leaders emphasized the role of education in implementing the SDGs, particularly through investment in research and innovation (UNESCO, 2016). This was further explored in 2016 at the Batumi Ministerial Conference, which assessed ESD progress and outlined future strategies (United Nations, Economic and Social Council, 2019).

In Ukraine, the origin of ESD is dated to 2003,

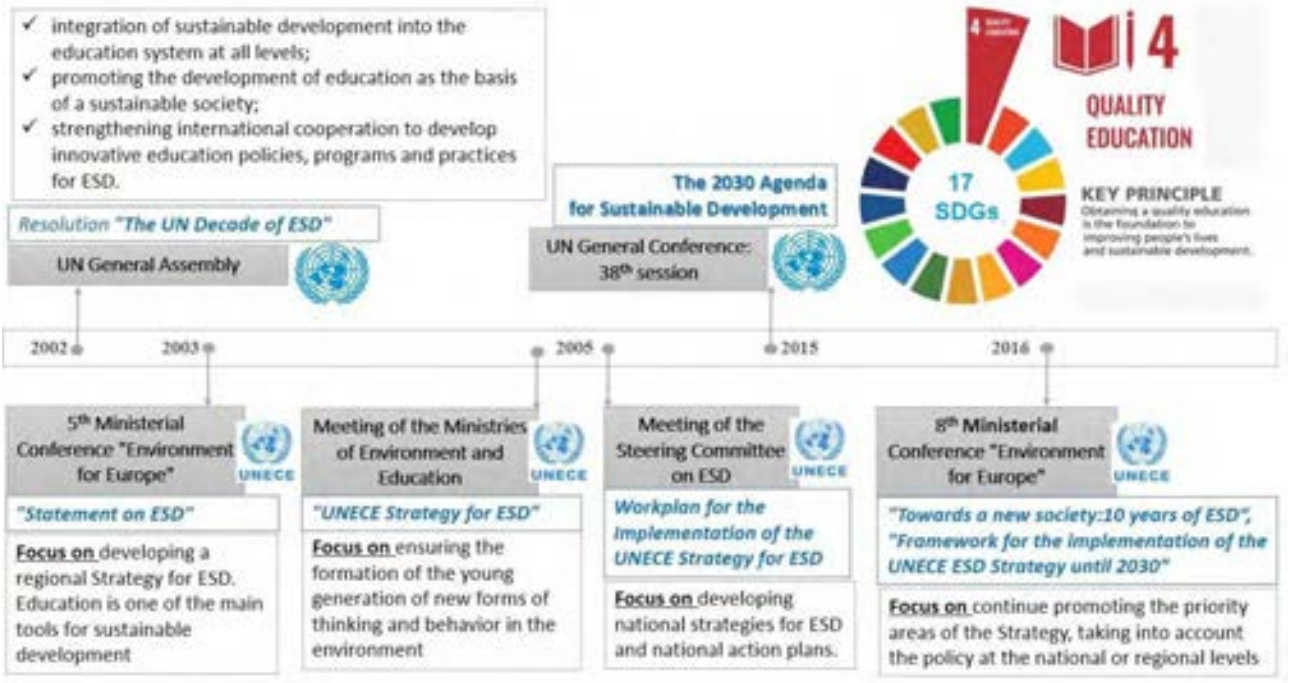


Fig. 2. Origins of ideas for sustainable development education XXI (compiled by the authors according UNITED NATIONS, 1972; Botkinet al.,1979; Our Common Future, 1989; United Nations, 1992a, 1992b; Elias, 2003; Statement by the Ministers of the Environment…, 2003; UNECE, 2005;UNDP, 2015; United Nations, 2015; Education 2030. Incheon Declaration…, 2016; Long-term strategy for the Convention until 2030; Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine, 2017; Club of Rome, 2021; http://hdr.undp.org/en/global-reports)

when the Kyiv Statement on ESD reinforced education as a tool for environmental protection and sustainability (Statement by the Ministers of the Environment…, 2003). This was further discussed at the 2005 UNECE Conference in Vilnius (Lithuania) (UNECE…, 2005).

ESD is evolving into a broad and interdisciplinary approach, addressing environmental, economic, and social challenges. It requires shifting from knowledge transmission to problem-solving and critical thinking, empowering individuals to develop solutions for sustainability. Successful implementation depends on strong political support at all governance levels and the integration of sustainable development principles across all education systems.

Quality education as a key pillar for the 2030 sustainable development

The importance and challenges of ESD as one of the SDGs. ESD empowers individuals to adopt new ways of thinking and take action toward a sustainable future (UNESCO. ESD, 2025). It equips students with the knowledge, skills, and values necessary to make informed decisions and take responsible actions for environmental integrity, economic viability, and social well-being, while embracing cultural diversity (UNESCO. Institute for Statistics, 2025). As a lifelong learning process, ESD is an essential component of quality education. The European Commission defines competences for lifelong learning as a combination of knowledge, skills and attitudes (European Commission, 2019).

In line with this, UNESCO seeks to expand access to quality ESD at all levels and in various social contexts. A reorientation of education is urgently needed to foster sustainability-focused knowledge, skills, and behaviors. Key global challenges – such as climate change, deforestation, biodiversity loss, ocean pollution, gender inequality, and hunger – demand an integrated approach in education. By incorporating these issues into curricula from an early age,

education can nurture ecological awareness and active citizenship, ensuring that individuals take responsibility for sustainable decision-making (UNESCO. ESD, 2025).

The 2030 SDGs recognize ESD as a fundamental part of quality education. Goal 4.7 directly relates to ESD, emphasizing the need for educational programs that promote sustainability (Knowledge Platform. 2024). Goal 4 – which ensures inclusive, equitable, and quality education – aims to provide free, quality primary and secondary education for all by 2030. Additionally, it emphasizes the accessibility of affordable and high-quality higher education regardless of gender (United Nations. Department of Economic and Social Affairs, 2024).

Given the increasing complexity of global challenges, the 17 SDGs provide a framework for addressing sustainability at local and regional levels. Quality education is not only a goal in itself but also a key enabler for achieving other SDGs. Its role in global development is profound, as education is a crucial investment that shapes the well-being of future generations and the sustainability of the planet (United Nations. Department of Economic and Social Affairs, 2024).

To meet the demands of the 21st century, education must foster values and competencies aligned with sustainable development. Achieving the SDGs requires investment in human potential, as people are the driving force behind progress. Education plays an increasingly vital role in global development, and international organizations have issued strategic recommendations to align educational systems with sustainability goals (Figure 3).

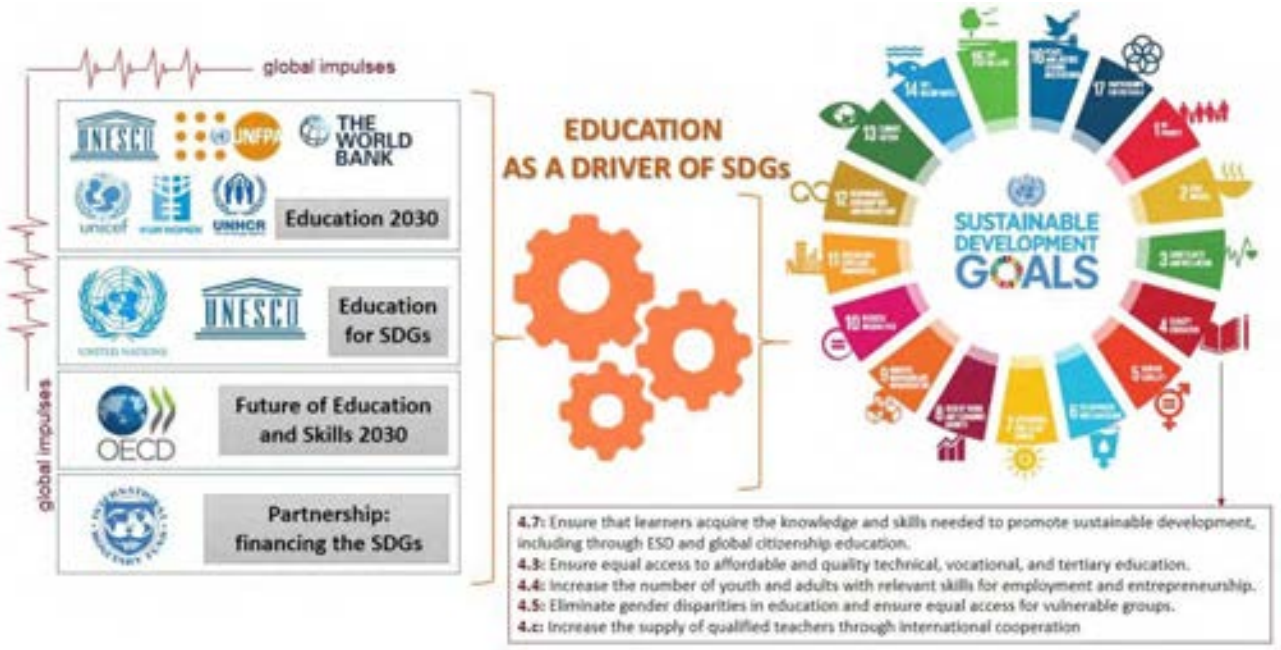


Fig. 3. Global impulses for education as a driver of Sustainable Development Goals (compiled by the authors)

UNESCO has developed comprehensive guidelines for integrating ESD into educational policies and curricula. By embedding sustainability principles at all levels – from individual course modules to national education strategies – societies can enhance responsible decision-making and collective engagement in sustainable development. The successful implementation of these recommendations will ensure that education remains a powerful tool for creating a more sustainable world.

Key priorities in ESD. As outlined in the Education-2030 Incheon Declaration, governments must provide political leadership in education, guide the contextualization of policies, and ensure the effective implementation of SDG 4 – Education-2030. Integrating education planning into poverty reduction and sustainable development strategies is crucial for achieving long-term sustainability goals. Many countries have demonstrated strong commitments to incorporating sustainable development principles into education at all levels. A notable example is the UNESCO agreement with the French Ministry of Education, signed on January 14, 2021, to establish the Office for Climate Education (Office for Climate Education, 2024). This center aims to strengthen climate change education worldwide, fostering greater awareness and action (UNESCO and France enhance Climate Change Education worldwide, 2021).

ESD requires teaching and learning approaches that inspire and equip students to change behaviors, engage in problem-solving, and take action for sustainability. It fosters key competencies such as critical thinking, scenario planning, and collaborative problem-solving (UNESCO Almaty, 2018). More

than just an educational framework, ESD is a philosophy, a mindset, and a way of life. It is often seen as a catalyst for educational innovation, fostering collaboration among schools, universities, communities, businesses, and policymakers. Today, ESD principles are embedded in multiple global action frameworks and conventions, including:

• Climate changes - Article 6 of the UN Framework Convention on Climate Change (UNFCCC);

• Biodiversity - Article 13 of the Convention on Biological Diversity (CBD);

• Chios Framework Program of Action for Capacity Building;

• Sustainable Consumption and Production Program (2012-2021).

Education lays the foundation for personal development, critical thinking, moral values, and problem-solving skills. It equips individuals with the necessary tools to adapt to global challenges and drive sustainable innovation.

Key principles of ESD:

• Empowerment for Responsible Decision-Making

ESD enables individuals to make informed decisions that preserve environmental integrity, ensure economic sustainability, and promote civil responsibility for future generations while respecting cultural diversity.

• Lifelong learning and quality education

ESD is not confined to formal education; it is an ongoing process that enhances personal, professional, and social competencies.

• Holistic approach across curricula

ESD must be integrated into all subjects and learning environments, ensuring sustainability concepts are reflected in teaching outcomes.

• Key curriculum themes

Curricula should incorporate fundamental sustainability concepts, including climate change; biodiversity and conservation; environmental safety; sustainable consumption and production; resource and energy efficiency; and human-environment relationships.

• Blending traditional knowledge and innovation

Effective ESD combines traditional cultural knowledge with modern interactive methodologies, fostering creative problem-solving and critical thinking.

• Global citizenship and public engagement

ESD fosters the development of global citizens who actively engage in regional and global sustainability efforts. Through citizen science initiatives, individuals can participate in environmental monitoring, decision-making, and sustainable solutions, particularly in geographical education.

• Learning outcomes: critical thinking and collective action

ESD cultivates key professional competencies, including critical and systemic thinking, collaborative decision-making, and accountability for current and future generations (Vincent and Mulkey, 2015).

Key aspects of implementing education for sustainable development worldwide

Experience in implementing ESD. In recent years, ESD has become a key driver of sustainability and a catalyst for innovation in education. It integrates various sectors – including schools, universities, communities, and the private sector – into creative solutions for global challenges (UNESCO, 2012).

About 100 countries have established national coordinating bodies for ESD, recognizing its relevance. However, in some cases, implementation remains theoretical, lacking integration into curricula. UNESCO reports that 59% of countries have taken action on biodiversity education, with 95% incorporating it into primary education, 100% into secondary education, 83% into higher education and 85% into teacher training (UNESCO, 2012, p.18).

Research highlights diverse ESD approaches, such as transformational learning, which fosters changes in habits, attitudes, and behaviors regarding environmental issues, resource consumption, and climate change (Mezirow, 1997; Mezirow and Associates, 2000; Morrell and O'Connor, 2002; Morar et al., 2021). ESD is present at all educational levels, from preschool to lifelong learning, enhancing emotional engagement and personal responsibility.

Using focus groups, policy analysis, and non-formal curricula, Adams et al. (2021) found that ESD strengthens local implementation, even in countries lacking national policies or educational resources. Similarly, a study across 18 countries that received high scores from the Program for International Student Assessment (PISA) related to the contribution of ESD to quality education (Laurie et al., 2016), found that ESD improves academic performance, critical thinking, and research skills. Another study in 14 countries worldwide revealed that students with ESD schools develop stronger critical thinking skills, a deeper understanding of research topics and better research skills. Students of free educational institutions and colleges of Germany, Finland, Scotland demonstrate excellent communication, writing and mathematical skills, while Korea shows strong problem-solving skills, and Estonia fosters independent thinking. Some ESD strategies also promote collaboration, equity, and diverse problem-solving perspectives (Nolet, 2015).

Regional differences in the implementation of ESD. The UNESCO report "Learn for our planet" (2021) highlights significant regional differences in integrating SD into curricula. Analyzing nearly 50 countries, the study found national curricula referen-

ced environmental issues more frequently than educational plans. However, over half did not mentioning climate change, and only 19% addressed biodiversity. While "environment" appeared in 83% of documents and "sustainability" in 69%, "climate change" and "biodiversity" were cited in just 47% and 19%, respectively. Subjects like biology, science, and geography most often included SD-related content.

A notable global ESD initiative is Finland's "HundrEd project", launched in 2015, which curates pedagogical innovations for sustainable development (HundrED Research, 2024). Italy's Reggio Emilia approach fosters creativity through outdoor learning of young children (Reggio Emilia Australia Information Exchange, 2024). Colombia's Escuela Nueva model enhances transversal competencies in 16 countries (Aldawsari, 2018).

The EU takes a broader approach to SD than the U.S., incorporating climate change, responsible consumption, resource management, energy, green transport, health, poverty, migration, and social adaptation. The European Commission's publication "An updated strategic framework for European cooperation in education" (2020) promoted ESD cooperation, while the "Lifelong Learning Program (2007-2013)" was the first tool to enhance education's role in sustainability. Academic freedom remains a core university principle in Sweden (Sammalisto and Brorson, 2008), Portugal (Ferreira et al.,2014), France (Gombert-Courvoisier et al., 2014), Czech Republic (Labodova et al., 2014) and Central and Eastern Europe regions (Adomssent et al., 2014).

Potential of geography to provide ESD

The integration of ESD into the curriculum is essential across disciplines. UNESCO's recommendations on 21st-century education (Reinfried et al., 2007) recognize geography, alongside philosophy, history and foreign languages, as a pillar of universal knowledge. Geographical education plays a key role in understanding global challenges and fostering sustainable development. Thus, developing geographical competencies in students is crucial at all educational levels.

Geography provides a comprehensive framework for understanding global issues, integrating natural and social sciences. As Meadows (2020) states, geography is the "science of sustainable development," offering methodological tools that bridge society and nature through spatial models (Maude, 2017, Meadows, 2020, Nemets, 2012). Its integrative nature supports ESD by fostering resilience, environmental awareness, and sustainability-oriented behaviors. Geographical education nurtures ecological worldviews, ethical decision-making, and practical actions for environmental protection. It develops knowledge across philosophical, natural, legal, social, economic, and technical domains, promoting balanced and sustainable development.

The Lucerne "Declaration on Geographical ESD" (Reinfried et al., 2007) emphasizes the importance of geography in sustainability education, highlighting key concepts such as location, spatial interaction, and environmental systems. Sustainable development requires education to reorient societal values, production, and consumption toward ecological balance. Contemporary perceptual geography enhances understanding of territories through spatial analysis, helping students grasp the consequences of human actions (Meadows, 2020; Nemets, 2016).

The International Geographical Union (IGU) promotes best practices in geographical education. The 2016 International Year of Global Understanding, launched in Jena, Germany, reinforced geography's role in bridging science, governance, and civil society for sustainability. IGU initiatives focus on defining core geographical knowledge, improving public perceptions of geography, and disseminating research on climate adaptation, biodiversity, and urban planning. These efforts ensure geography remains a leading discipline in ESD (Global understanding, 2025).

Despite being proclaimed in 2016, the principles of the International Year of Global Understanding remain highly relevant. Scholars continue to emphasize geography's role in ESD, advocating for its integration across educational levels (Bednarz et al., 2007; Reinfried et al., 2007; Mellalieu, 2008; Demirci et al., 2018; Sprenger and Nienaber, 2018; Meadows, 2020). The International Charter of Geographical Education (International Geographical Union, 2016) affirms geography's importance in understanding the "society–economy–nature" system and fostering sustainability. Students must acquire the necessary knowledge and competencies to actively contribute to sustainable development. By focusing on human-environment interactions, geography equips learners with the tools to address global sustainability challenges effectively.

Geographical ESD in Ukraine

Post-Soviet Transition and Educational Reforms in Ukraine. After regaining independence from the Soviet Union in 1991, Ukraine undertook significant reforms to move away from the Soviet model, which had deeply influenced its education system, economy, and governance. The 2004 Orange Revolution and the 2014 Euromaidan protests were pivotal in Ukraine's ongoing struggle for democracy and its alignment with European values.

A major milestone in this transition was the signing of the Association Agreement with the European Union in 2014, which aimed to align Ukraine's policies and standards with those of the EU. This shift toward European integration brought profound changes to the education system, particularly in

moving away from a russian-centric approach. Educational reforms focused on modernizing curricula, improving teacher training, and incorporating sustainable development principles into education.

One of the most notable changes was the promotion of critical thinking, civic responsibility, and alignment with European educational norms. There was also a concerted effort to reduce the dominance of the russian language in education, emphasizing Ukrainian as a means of strengthening national identity.

Integration with Europe has also led to an increased focus on ESD. However, Ukraine's geopolitical challenges have shaped its ESD priorities differently from those of more stable nations. While many countries emphasize holistic development and environmental sustainability, Ukraine's efforts often center on resilience, security, and post-conflict recovery.

A key challenge remains the need for extensive teacher training and resources to effectively implement ESD principles in classrooms. Many educators lack access to professional development programs, a contrast to countries where ESD training is well-established. Additionally, public awareness of sustainable development issues is still growing, and while some aspects of ESD have been integrated into specific subjects, a comprehensive national framework is still evolving.

Institutional support of ESD in Ukraine. The integration of SDGs into education worldwide has seen significant progress. Since the introduction of sustainable development principles, leading universities have incorporated these ideas into curricula, research, and interdisciplinary collaboration. Universities play a crucial role in training professionals who understand sustainable development and its societal impact, particularly in leadership roles (e.g. management positions). Great progress has been made in the higher education to implement sustainable development, from the classroom, to research and cooperation with stakeholders.

The High-Level Political Forum on Sustainable Development 2020 (United Nations. High-level Political Forum on Sustainable Development, 2024), emphasized higher education's fundamental role in achieving all 17 SDGs. Major academic organizations – Agence Universitaire de la Francophonie (AUF, 2025), the Association of Commonwealth Universities (The Association of Commonwealth Universities, 2025) and the International Association of Universities (International Association of Universities, 2025) – stressed the need for universities to lead in addressing poverty, environmental protection, gender equality, and cultural understanding. They highlighted the importance of global cooperation, interdisciplinary research, and knowledge-sharing to drive sustainable. There are already concerted efforts to advance the 2030 Agenda within the higher education and to promote recognition of the key driving role of the higher education in achieving SDG. Nevertheless, the collaboration between education (universities) and stakeholders/administration (governing structures) for decision-making regarding the SDGs is still not strong and evident enough (United Nations. High-level Political Forum on Sustainable Development, 2024).

Ukraine has adopted the 17 SDGs and 169 targets (United Nations. Sustainable Development Goals, 2024). However, no dedicated framework exists for integrating SDGs into educational programs, and implementation guidelines are lacking. This is despite the Law of Ukraine on the Strategy of Sustainable Development of Ukraine until 2030 (Draft Law of Ukraine On the Strategy for Sustainable Development…, 2018) specifies the legal, financial, economic, information and communication, educational and research tools on its embodiment.

Key national education objectives include "Ensure access to quality school education for all children and adolescents; Ensure the availability of quality preschool development for all children; Ensure access to vocational education; Improve the quality of the higher education and ensure its close connection with science; Increase the prevalence among the population of knowledge and skills necessary for decent work and entrepreneurship; Eliminate gender inequality among school teachers; Create modern learning conditions in schools" (United Nations Ukraine, 2024). Despite the efforts, the national report "Sustainable Development Goals: Ukraine" does not assess public awareness of SDGs or directly address SDG 4.7, which emphasizes education for sustainable development, human rights, global citizenship, and cultural diversity (United Nations Ukraine, 2024).

Despite defining educational levels (spanning from preschool, secondary education, vocational education, professional higher education and higher education) and competency standards in its Law on Education (2017) and Law on Higher Education (2014), Ukraine has not explicitly integrated SDG principles into its educational framework. While lifelong learning is recognized as a priority, participation in formal and non-formal education remains low at 9% among those aged 15–70 (United Nations. Sustainable Development Goals, 2024).

The Law on Sustainable Development Strategy of Ukraine until 2030 (Draft Law of Ukraine On the Strategy for Sustainable Development…, 2018) calls for embedding UNECE Sustainable Development Strategies into education standards across all disciplines. It underscores the role of higher education institutions in training professionals to develop and use new technologies that ensure transition of society to sustainable development, and researching solutions

for environmental, social, and economic challenges.

While progress has been made, Ukraine needs clearer policies, institutional support, and broader public engagement to fully integrate sustainable development into its education system.

The education system in Ukraine in view of the ESD. The integration of ESD in Ukraine begins at the preschool level, where children are introduced to sustainability concepts through activities that promote environmental awareness and responsible behavior. The ESD course fosters an early understanding of sustainability, encouraging children to recognize their role in preserving the Earth's resources and developing habits and patterns focused on sustainable development.

At the general secondary education level, ESD is embedded through cross-cutting content lines, which integrate key competencies across subjects (Ministry of Education and Science of Ukraine, 2021). These lines include:

- "Environmental Security and Sustainable Development" – promoting ecological responsibility and awareness.
- "Civil Responsibility" – fostering active citizenship and social engagement.
- "Health and Safety" – developing emotional resilience and a healthy lifestyle.
- "Entrepreneurship and Financial Literacy" – equipping students with economic and financial knowledge relevant to sustainability.

Beyond the classroom, extracurricular activities, such as participation in environmental clubs, nature protection societies, and involvement in projects of public organizations, further reinforce sustainability principles.

At the higher education level, universities play a crucial role in advancing ESD, influencing social, economic, and environmental policies while shaping sustainability-conscious professionals. The increasing inclusion of ESD in research, curricula, and institutional policies enhances its impact on society.

Non-formal education is also gaining importance, aligning with the European "lifelong learning" or "adult education" model. Recognized under Article 8 of Ukraine's Law on Education (2017), non-formal education obtained through educational programs and providing professional and / or partial educational qualifications, provides specialized training in financial literacy, IT, environmental awareness, and social responsibility. The COVID-19 pandemic accelerated digitalization, expanding access to online courses on sustainability topics such as "Sustainable Development: A New Philosophy of Thinking", "Online Education for Sustainable Development", "What to Do Next: Civil Servants on Sustainable Development", "What to Do Next: Communities on Sustainable Development", and "What to Do Next: Business on sustainable development".

Ukraine's education system is undergoing a transformative phase, gradually integrating ESD across all levels. While progress is evident, further alignment between formal and non-formal education is essential to fully realize the lifelong learning approach in the context of sustainable development.

The role of Geography in education for ESD in Ukraine. Geography plays a crucial role in general secondary education, equipping students with an understanding of human-environment interactions. At the general secondary education, geography is introduced through "Natural Science", which includes the discipline of "Geography", consisting of courses such as "General Geography", "Continents and Oceans", "Ukraine in the World: Nature and Population", and "Ukraine and the World Economy" (Law of Ukraine About education, 2017).

From the sixth grade onward, geography teachers foster ecological thinking, using topics that explore human-nature relationships. Practical learning through fieldwork, expeditions, and environmental initiatives further reinforces these concepts. Participation in research projects under the "Small Academy of Sciences" helps students develop analytical skills related to sustainability.

At the "Geography" profile in the secondary education level, students study "Geography: Regions and Countries" and "Geographical Space of the Earth" (Law of Ukraine About Education, 2017). Geography serves as a key subject for integrating ESD principles, addressing sustainability at global, regional, and local levels through the cross-cutting theme "Environmental Security and Sustainable Development." The subject encourages students to adopt sustainable behaviors and develop practical solutions for environmental challenges. However, challenges remain in fully aligning geography education with ESD, including curriculum design, teaching methods, and teacher training. Addressing these issues is essential for maximizing geography's potential as a foundation for sustainability education.

Higher education in Geography and sustainable development in Ukraine. Ukraine's education system is aligning with international standards, particularly through the harmonization of its List of Knowledge Areas and Specialties with the International Standard Classification of Education (ISCED-F 2013) (UNESCO, 2015). According to Ukrainian legislation (Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine, 2015), Geography belongs to Field 10 – Natural Sciences, Specialty 106 – Geography. Based on ISCED-F 2013, it corresponds to three detailed fields: 0532 Earth sciences – geography (physical, natural); 0314 Sociology and cultural studies – geography (human, social, cultural); 0731 Architecture and town planning – cartography, city and regional

planning (UNESCO, 2015).

A significant change in 2024 reclassified Geography as "C6 – Geography and Regional Studies", now under "C – Social Sciences, Journalism, Information, and International Relations" (Cabinet of Ministers of Ukraine, 2024). In C6, the content for the higher education includes 0314 Sociology and cultural studies and 0532 Earth sciences (Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine, 2024). The new classification better reflects geography's interdisciplinary nature and relevance to regional studies and sustainable development.

In higher education, the Bachelor's and Master's programs in Geography integrate competences defined as "Ability to solve complex specialized problems and practical problems characterized by complexity and uncertainty of conditions in professional activities in geography or in the learning process using modern theories and methods of research of natural and social objects and processes" (Ministry of Education and Science of Ukraine, 2021). *These programs* focus on solving complex spatial, environmental, and socio-economic issues using modern research methods. As of 2024, 15 universities offer undergraduate programs in Geography, including leading institutions such as Taras Shevchenko National University of Kyiv, V. N. Karazin Kharkiv National University, and Ivan Franko National University of Lviv. Master's programs are offered at 12 universities, with a strong emphasis on sustainability, regional planning, and environmental management. The PhD's programs in Geography integrate competences defined as "The ability to generate new ideas, solve complex problems in professional and/or research-innovative activities in the fields of geography, environmental management, and regional development, apply modern methodologies of scientific and pedagogical activities, and conduct independent scientific research with results that possess scientific novelty, as well as theoretical and practical significance" (Ministry of Education and Science of Ukraine, 2024). As of 2024, 5 universities offer PhD programs in Geography: Taras Shevchenko National University of Kyiv, V. N. Karazin Kharkiv National University, Odessa I.I. Mechnikov National University, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Kherson State University.

Geography programs integrate ESD through courses like "Geographical Foundations of Sustainable Development," "Sustainable Development Strategy," "Nature and Sustainable Development", "Sustainable Development: Conceptual and Indicator analysis" , "Sustainable Development of Cities and Regions", "Regional Problems of Sustainable Development", "Fundamentals of Sustainable Development of Ukraine", "Geography of Risks and Sustainable development", "Geographical Aspects of Global Problems of Mankind", and "Global Problems of Nowadays". The curriculum fosters interdisciplinary research, environmental awareness, and regional development strategies. Educational programs of human-geographical orientation, in our opinion, provide implementation of ESD, because complexity of the subject area of the study of geography, extend of problems that shape the social demand for these studies require not only to apply all the possibilities of interdisciplinary, including principles and methods of natural sciences, which allows to develop and implement new approaches to organization, modeling and forecasting of socio-geographical processes in the regional context in particular based on SD principles (Nemets, 2012, Niemets 2019, Kostrikov et al., 2018).

Despite its high academic potential, human geography in Ukraine faces challenges in aligning curricula with European standards, ensuring graduate competitiveness, and integrating modern interdisciplinary approaches (Denysyk et al., 2020, Nemets, 2012, Niemets 2023). This has led to an unclear definition of human geography specialists in the labor market. This is due to slow restructuring of all geographical education, which generated Soviet-period professionals with a very wide range of disciplines and narrow opportunities to develop and apply competencies that allow young people to be potentially competitive in the labor market. Such education is obliged to form creative thinking, the ability to analyze, propose and make optimal decisions, predict ways to manage the region based on creativity, scientific research and generalization of ideas, explanation of processes, phenomena, and prediction of their development. All this is only a part of the task of specialists in the field of human geography and regional development, which requires urgent changes in the structure of training in this field. The outlined tasks assigned to educational programs should form the basis of competencies of graduates, comprising the intellectual potential of Ukraine (Nemets, 2012, Niemets 2018, 2019).

Ukraine's geography education is expanding international cooperation through academic mobility programs, research collaborations, and sustainability projects. V. N. Karazin Kharkiv National University plays a key role, ranking among Ukraine's top universities in the QS World University Rankings 2024. The NATO Advanced Research Workshop (2023) on military brownfields redevelopment and cooperation with European universities under Erasmus+, and the publications in Special Springer Issues, highlight efforts to integrate Ukrainian geography education into the global academic landscape.

By modernizing educational programs, fostering international research partnerships, and implementing sustainability-focused policies, Ukraine's geogra-

phy education system aims to positioning itself as a leader in sustainable regional development and environmental studies on a global scale.

Discussion

Analyzing the historical evolution of sustainable development shows that changing "human qualities" is only possible through education – a concept emphasized in Aurelio Peccei's works (Club of Rome, 2021). ESD plays a crucial role at all levels, from preschool to lifelong learning, requiring a well-coordinated approach across stages. Since the mid-20th century, ESD has evolved through phases of general, environmental, and sustainability education, responding to societal needs. However, these efforts have largely remained human-centered, failing to foster a true biocentric, nature-centric, and eco-centric mindset. Without shifting from anthropocentric views, humanity continues to exploit the environment without ensuring the biosphere's self-regulation and renewal. ESD must become a global, standardized approach to achieving sustainability and preserving the planet for future generations. Despite increased attention to ESD since the late 20th century, challenges remain in its effective implementation. Geography should serve as the foundation of ESD, as it integrates knowledge of nature, society, and their interactions. To advance ESD, further interdisciplinary research is needed to shape the collective mindset of a modern global society and address the growing anthropogenic challenges. Key priorities include:

• Developing a standardized, interdisciplinary ESD framework;

• Designing a comprehensive ESD model that integrates global best practices, specialized knowledge, pedagogical approaches, and learning methods across all educational stages;

• Ensuring the gradual accumulation of ESD competencies and practical skills at all levels (preschool, secondary, higher education, formal and non-formal learning), reinforcing lifelong education and sustainability principles.

By refining ESD standards and models, is is possible to equip future generations with the necessary mindset and skills to live sustainably and safeguard the biosphere.

Conclusions

Education is a vital tool for achieving the SDGs and is itself one of the SDGs. Global experience shows that higher education institutions play a crucial role in training specialists based on sustainability principles. ESD takes various forms, with diverse approaches to core SD competencies, yet its implementation depends on multiple factors. Transformational learning fosters critical thinking, changes social and individual behavior, and cultivates a generation aware of its role in achieving sustainability and taking responsibility for change.

Content analysis of ESD studies indicates a lack of a unified approach to implementation across educational levels. Further research is needed to develop effective, adaptable models that integrate SD competencies into all levels of education, all forms and institutions. The success of ESD depends on national education strategies and the incorporation of SD principles into curricula, research, and policy-making.

Higher education plays a pivotal role in fostering SD competencies by training professionals for sustainable societal development. An interdisciplinary approach-engaging public figures, policymakers, businesses, and researchers-enhances understanding and practical application of SD principles. Stronger collaboration between universities, research institutions, industries, and authorities is essential for shaping innovative behavior and critical thinking. This integration not only improves theoretical knowledge but also develops practical skills necessary for real-world sustainability challenges.

In Ukraine, integrating the SD paradigm into educational programs and training of specialists at all levels of education remains a pressing issue. ESD implementation faces challenges, including curriculum changes and the need for a national strategy. Universities must play a key role in advancing SD, addressing challenges, and leveraging research and technological advancements. Strengthening partnerships between educational institutions, governments, businesses, and international organizations is critical for achieving SD goals. Current education reforms in Ukraine call for curriculum transformation, increased practical training, and alignment with labor market demands. This requires an interdisciplinary learning approach including three main components: formation of in-depth professional knowledge and development of scientific outlook; mastering universal skills of research and teaching work; and development of language competencies which is extremely relevant in a globalized world.

Geography, as an interdisciplinary and sustainability-focused science, offers significant potential for ESD. The school geography curriculum already incorporates key SD principles, but their full realization requires diverse teaching methods and teacher engagement. In Ukraine's higher education, geography should be recognized as a core discipline across all specialties, aligning with international ESD standards. Education, as the largest social system shaping public consciousness, must embed sustainability values beyond formal education to drive ethical and sociocultural progress. Ignoring sustainability in education risks perpetuating unresolved global, regional, and local issues. In Ukraine's higher geographical education, defining its role, improving curricula, and strengthening human-geographical education based on sustainability principles should be a research priority.

Acknowledgements

C.F. thanks the Portuguese funding by FCT-Foundation for Science and Technology, P.I., through the institutional scientific employment program-contract (CEECINST/00077/2021).

References

1. *Morar, C., Berman, L., Erdal, S., & Niemets, L. (Eds) (2024). Achieving Sustainability in Ukraine through Military Brownfields Redevelopment. NATOARW 2023. NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security (NAPSC). Dordrecht: Springer, 470. https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-024-2278-8*
2. *Adams, S., Farrelly, T., Holland, J. (2021). Non-formal ESD: A Case Study of the "Children in the Wilderness" Eco-Club Programme in the Zambezi Region. J. Educ. Sustain. Dev. https://doi.org/10.1177/0973408220980871*
3. *Adomssent, M., Fischer, Godemannb, J., Herzigc, C., Ottea, I., Rieckmann, M., Timma, J. (2014). Emerging areas in research on higher ESD – management education, sustainable consumption and perspectives from Central and Eastern Europe. J. Clean. Prod. 62, 1-7. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.045*
4. *Aldawsari, R. A. (2018). The Escuela Nueva (The New School) in Colombia; An Innovative Educational Program in Developing Countries. Multy-knowl. Electron. Compr. J. Educ. Sci. Publ. 15. https://www.mecsj.com/uplode/images/photo/The_Escuela_Nueva.pdf*
5. *AUF. https://www.auf.org/ (accessed 13 January 2025)*
6. *Bednarz, R. S., Petersen, J. F., Bednarz, S. W. (2007).Geography and ESD in the United States: The Need for Educational Resources. Internationale Schulbuchforschung, 29 (2), Bildung für nachhaltige Entwicklung. ESD, Berghahn Books, 171-184.*
7. *Botkin, J. W., Elmandjra, M., Malitza, M. (1979). Nolimitstolearning. Bridging the Human Gap: The Reportto the Club of Rome. Oxford: PergamonPress, 159. https://doi.org/10.1016/C2009-0-09505-1*
8. *Cabinet of Ministers of Ukraine – Government Portal. https://www.kmu.gov.ua/en (accessed 29 October 2024)*
9. *Club of Rome (2021). Impact Hubs. https://www.clubofrome.org/ (accessed 10 May 2024)*
10. *Copernicus – The University Charter for Sustainable Development. Geneva, May 1994. https://www.iau-hesd.net/sites/default/files/documents/copernicus.pdf*
11. *Demirci, A. Gonzalez, R. de Miguel, Bednarz, S. (Eds). (2018). Geography Education for Global Understanding. Springer, International Perspectives on Geographical Education (IPGE), 252.*
12. *[Денисик, Г. І., Мезенцев, К. В., Антіпова, Є. А., & Кізюн, А. Г. (2020). Географія повсякдення: просторове різноманіття повсякденного життя. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (52), 130-138. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-52-10] Denysyk, G., Mezentsev, K., Antipova, E., Kiziun, A. (2020). An everyday geography: spatial diversity of the everyday life. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (52), 130-138 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-52-10*
13. *Department of Human Geography and Regional Studies named after Kostiantyn Niemets. V. N. Karazin Kharkiv National University. http://soc-econom-region.univer.kharkov.ua (accessed 9 October 2024)*
14. *Draft Law of Ukraine On the Strategy for Sustainable Development of Ukraine until 2030 dated 07.08.2018 No. 9015 https://ips.ligazakon.net/document/JH6YF00A?an=650*
15. *Elias, V.V. (2003). Review of the most important international agreements in the field of ESD http://www.ecoaccord.org/edu/Obzor-Int.agreements.htm (accessed 15 December 2024)*
16. *European Commission (2019). Key Competences for Lifelong Learning. https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/297a33c8-a1f3-11e9-9d01-01aa75ed 71a1/language-en*
17. *Evans, D., Janes-Bassett, V., Borrelli, P., Chenu, C., Ferreira, C.S.S., Griffiths, R., Kalantari, Z., Keesstra, S., Lal, R., Panagos, P., Robinson, D., Seifollahi-Aghmiuni, S., Smith, P., Steenhuis, T., Thomas, A., Visser, S. (2021). Sustainable futures over the next decade are rooted in soil science. Eur. J. Soil Sci.1-16. https://doi.org/10.1111/ejss.13145*
18. *Ferreira, S., Cabral, M. et al. (2014). Economic and environmental impacts of the recycling system in Portugal. J. Clean. Prod. 79, 219-230. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.026*
19. *Global understading. http://www.global-understanding.info/ (accessed 2 February 2025)*
20. *Gombert-Courvoisier, S., Sennes, V., Ribeyre, M. R., Ribeyre F. (2014). HigherEducation for Sustainable Consumption: case report on the Human Ecology Master'scourse (University of Bordeaux, France). J. Clean. Prod. 62, 82-88. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.05.032*
21. *HundrED Research. https://hundred.org/en/research (accessed 5 December 2024)*
22. *International Association of Universities. https://www.iau-aiu.net/ (accessed 19 January 2025)*
23. *International Geographical Union (2016). International Charter on Geographical Education. Commission on Geographical Education. https://www.igu-cge.org/wp-content/uploads/2019/03/IGU_2016_eng_ver25Feb2019.pdf*
24. *Ivan Franko National University of Lviv. https://lnu.edu.ua/en/ (accessed 8 June 2024)*
25. *Kalantari, Z., Ferreira, C.S.S., Pan, H., Pereira, P. (2023). Nature-based solutions to global environmental challenges. Science of The Total Environment. 880, 163227. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163227*
26. *Kamianets-Podilskyi Ivan Ohiienko National University. https://kpnu.edu.ua/ (accessed 8 June 2024)*
27. *Kherson State University. https://www.kspu.edu/ (accessed 8 June 2024)*
28. *Knowledge Platform. https://sustainabledevelopment.un.org/focussdgs.html (accessed 24 June 2024)*

29. Kostrikov, S., Niemets, L., Sehida, K., Niemets, K., Morar, C. (2018). Geoinformation Approach to Urban Geographic System Research (Case Studies of Kharkiv region). Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology. (49), 107-124. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2018-49-09
30. Labodova, A., Lapchik, V., Kodymová, J., Turjak, J., Pivko, M. (2014). Sustainability teaching at VSB – Tehnical University of Ostrava. Journal of Cleaner Production. 62, 128-133. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.03.019
31. Laurie, R., Nonoyama-Tarumi, Y., Mckeown, R., Hopkins, C. (2016). Contributions of ESD (ESD) to Quality Education: A Synthesis of Research. J. Educ. Sustain. Dev. 10:2, 226–242. https://doi.org/10.1177/0973408216661442
32. [Закон України про освіту № 2145-VIII (2017). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2145-19#Text] Law of Ukraine About Education # 2145-VIII (2017). [in Ukrainian]. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2145-19#Text
33. [Закон України про вищу освіту № 1556-VII (2014). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-18#Text] Law of Ukraine About Higher Education. # 1556-VII (2014). [in Ukrainian]. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-18#Text
34. Lesya Ukrainka Volyn National University. https://vnu.edu.ua/en (accessed 10 June 2024)
35. Maude, A. (2017). Applying the concept of powerful knowledge to school Geography. The Power of Geographical Thinking, Springer, Cham, 27-40.
36. Maude, A. (2018). Geography and powerful knowledge: a contribution to the debate. Int. Res. Geog. Environ. Educ. 27 (2), 179–190. https://doi.org/10.1080/10382046.2017.1320899
37. Meadows, M. E. (2020). Geography ESD. Geogr. Sustain. 1 (1), 88-92. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666683920300018
38. Mellalieu, P. J. (2008). Shifting frontiers, new priorities, creating pathways: elevating the case for tertiary ESD in New Zealand. Education for sustainability (EfS). https://www.researchgate.net/publication/228916224_Shifting_frontiers_new_priorities_creating_pathways_elevating_the_case_for_tertiary_education_for_sustainable_development_in_New_Zealand
39. Mezentsev, K. (2020). Ukraine in Transformation: From Soviet Republic to European Society. Int. J. Urban Reg. Res. 44 (5), 943-945. https://doi.org/10.1111/1468-2427.12959
40. Mezirow, J. & Associates (2000). Learning as Transformation: Critical Perspectives on a Theory in Progress. San Francisco: Jossey Bass, 371.
41. Mezirow, J. (1997). Transformative Learning: Theory to Practice. New Directions For Adult And Continuing Education. 74, 5-12. https://cmapsconverted.ihmc.us/rid=1MCY1CBS9-W00F4X-15W8/Transformative-Learning-Mezirow-1997.pdf
42. Ministry of Economic Developmentand Trade of Ukraine (2017). Sustainable Development Goals: Ukraine. National Baseline Report. https://www.ua.undp.org/content/ukraine/en/home/library/sustainable-development-report/sustainable-development-goals--2017-basseline-national-report.html (accessed 28 May 2024)
43. [Міністерство освіти і науки України (2021). Затверджені стандарти вищої освіти. https://mon.gov.ua/ua/osvita/visha-osvita/naukovo-metodichna-rada-ministerstva-osviti-i-nauki-ukrayini/zatverdzheni-standarti-vishoyi-osviti] Ministry of Education and Science of Ukraine (2021). The higher education standards Approved. [in Ukrainian]. https://mon.gov.ua/ua/osvita/visha-osvita/naukovo-metodichna-rada-ministerstva-osviti-i-nauki-ukrayini/zatverdzheni-standarti-vishoyi-osviti
44. [Міністерство освіти і науки України (2024). Стандарт вищої освіти зі спеціальності 106 Географія для третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти https://mon.gov.ua/static-objects/mon/sites/1/vishcha-osvita/zatverdzeni%20standarty/2024/13.08.2024/106.Heohrafiya-doktor.filosofiyi-1128.vid.13.08.2024.pdf] Ministry of Education and Science of Ukraine (2024). The higher education standards Approved: 106 Geography PhD [in Ukrainian]. https://mon.gov.ua/static-objects/mon/sites/1/vishcha-osvita/zatverdzeni%20standarty/2024/13.08.2024/106.Heohrafiya-doktor.filosofiyi-1128.vid.13.08.2024.pdf
45. Morar, C., Lukić, T., Basarin, B., Valjarević, A., Vujičić, M., Niemets, L., Telebienieva, I., Nagy, G. (2021). Shaping Sustainable Urban Environments by addressing the Hydro-Meteorological Factors in the Landslide Occurrence: Ciuperca Hill (Oradea, Romania). Int. J. Environ. Res. Public Health. 18(9), 5022. https://doi.org/10.3390/ijerph18095022
46. Morrell, A., O'Connor, M. (2002). Introduction. In O'Sullivan, E., Morrell, A. & O'Connor, M. (Eds). Expanding the Boundaries of Transformative Learning: essays on theory and praxis. New York: Palgrave Macmillan, pp.xv-xx.
47. Mukachevo State University. https://msu.edu.ua/ (accessed 8 June 2024)
48. [Нємець Л.М. (2016). Підземні води як чинник стійкого розвитку регіону. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (45) 62-66. http://journals.uran.ua/geoeco/article/view/96098/91496] Nemets, L. M. (2016). Underground water as factor of sustainable regional development. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology. (45), 62-66 [in Ukrainian]. http://journals.uran.ua/geoeco/article/view/96098/91496
49. [Нємець Л. М., Сегіда К. Ю., Гусєва Н. В., Ключко Л. В. (2016). Місце суспільної географії у підготовці фахівців зі спеціальності «Науки про Землю». Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Від географії до географічного країнознавства: еволюція освітньо-наукових ідей та пошуків (до 140-річчя географії у Чернівецькому національному університеті імені Юрія Федьковича)», м. Чернівці, 111–113] Nemets, L. M., Sehida, K. Y., Husieva, N. V., Kliuchko, L. V. (2016). The place of human geography in the training specialists in the specialty "Earth Sciences". Proceedings of the International Scientific and Practical Conference

"From Geography to Geographical Country Studies: Evolution of Educational and Scientific Ideas and Findings (to the 140th Anniversary of Geography at Yuri Fedkovych National University of Chernivtsi)", Chernivtsi, 111-113 [in Ukrainian].

50. [Нємець, Л. (2012). Сучасна соціальна географія: аналіз стану, проблеми та перспективи. Часопис соціально-економічної географії, 13(2), 14-20. https://periodicals.karazin.ua/socecongeo/article/view/6585] Nemets, L. (2012). Modern social geography: analysis of the situation, problems and prospects. Human Geogr. J. 13(2), 14-20. [in Ukrainian]. https://periodicals.karazin.ua/socecongeo/article/view/6585 [in Ukrainian].
51. [Нємець Л. М. (2018). Суспільна географія: сучасні виклики, реалії, перспективи. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Регіон – 2018: стратегія оптимального розвитку», м. Харків, 37–42] Niemets L.M. (2018). Human geography: modern challenges, realities, prospects. Proceedings of the international scientific-practical conference Region 2018: strategy of optimal development, Kharkiv, 37-42 [in Ukrainian].
52. Niemets, L., Sehida, K., Kliuchko, L., Telebienieva, I., Niemets, K. (2019). Some issues of the methodological status of human geography in the context of interdisciplinary research. Proceedings of the international scientific-practical conference "Region 2019: strategy of optimal development", Kharkiv, 17-22.
53. Niemets, L., Sehida, K., Kobylin, P., Tahsin Şahin, M., Bartosh, O., Telebienieva, I., Kravchenko, K., & Kliuchko, L. (2023). Integrative role of human geography in solving global problems of modernity. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology. (58), 171-187. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-14
54. Nizhyn Mykola Gogol State University. https://en.ndu.edu.ua/ (accessed 9 June 2024)
55. Nolet, V. (2015). Educating for Sustainability: Principles and Practices for Teachers (1st ed.). Routledge. https://doi.org/10.4324/9781315867052.
56. Odessa I.I. Mechnikov National University. http://onu.edu.ua/en/ (accessed 8 June 2024)
57. Office for Climate Education. https://www.oce.global/en (accessed 16 June 2024)
58. Oles Honchar Dnipro National University. http://www.dnu.dp.ua/en (accessed 9 June 2024)
59. Poltava V.G. Korolenko National Pedagogical University. https://pnpu.edu.ua/ (accessed 8 June 2024)
60. Potocki, K., Raska, P., Ferreira, C.S.S., Bezak, N. (2023). Translating Nature-Based Solutions for Water Resources Management to Higher Educational Programs in Three European Countries. Land. 12 (11), 2050. https://doi.org/10.3390/land12112050
61. QS World University Rankings https://www.topuniversities.com/universities/v-n-karazin-kharkiv-national-university#wurs (accessed 27 June 2024)
62. Reggio Emilia Australia Information Exchange. https://reggioaustralia.org.au/ (accessed 19 June 2024)
63. Reinfried, S. Schleicher, Y. Rempfler A. (2007). Geographical Views on ESD. Proceedings of the Lucerne-Symposium, Switzerland, July 29-31, 2007. Geographiedidaktische Forschungen, 42, 243-250.
64. [Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження переліку галузей знань і спеціальностей, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої освіти» (2015). № 266. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/ru/266-2015-%D0%BF?lang=uk#Text]
Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine: On approval of the list of branches of knowledge and specialties in which the higher education students are trained (2015). # 266. [in Ukrainian]. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/ru/266-2015-%D0%BF?lang=uk#Text
65. [Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження переліку галузей знань і спеціальностей, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої освіти» № 266 від 2015 року (в редакції Постанови Кабінету Міністрів України від 30.08.2024 No. 1021. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/266-2015-%D0%BF#n11]
Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine: On approval of the list of branches of knowledge and specialties in which the higher education students are trained. № 266, 2024 as amended by the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated August 30, 2024, No. 1021. [in Ukrainian]. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/266-2015-%D0%BF#n11
66. Rudenko L.H, Zaiachuk M.D., Lisovskyi S.A., Maruniak Eu.O., Munich N.V., Peresadko V.A., Ponomarenko O.M. (2022). Russia's Military Aggression in Ukraine and its Consequences for Geographic Education and Science. Ukrainian Geogr. J. 4 (120), 4-12 https://doi.org/10.15407/ugz2022.04.004
67. Sammalisto, K.,Brorson, T. (2008). Trai11ing and communication in the implementation of environmental management systems (ISO 14001): a case study at the University of Gavle, Sweden. J. Clean. Prod. 16 (3), 299-309. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.07.029
68. Sprenger, S. & Nienaber, B. (2018). (Education for) Sustainable Development in Geography Education: review and outlook from a perspective of Germany. J. Geogr. High. Educ. 42:2, 157-173, https://doi.org/10.1080/03098265.2017.1379057
69. Statement by the Ministers of the Environment of the UNECE countries on ESD. The Environmental Process for Europe. Kyiv, 2003.
70. Sumy State Pedagogical University named after A.S. Makarenko. https://sspu.edu.ua (accessed 21 June 2024)
71. Sustainable development policies in Karazin University. https://karazin.ua/en/universitet/tsili-staloho-rozvytku/polityky-staloho-rozvytku/ (accessed 12 October 2024)
72. Taras Shevchenko National University of Kyiv. http://www.univ.kiev.ua/en/ (accessed 8 June 2024)
73. Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University. https://tnpu.edu.ua/en/ (accessed 8 June 2024)
74. The Association of Commonwealth Universities. https: //www.acu (accessed 14 January 2025)
75. The single state electronic database on education. https://vstup.edbo.gov.ua/ (accessed 8 June 2024)

76. UNDP (2015). Sustainable Development Goals 2030. 23.
77. UNDP. Human Development Reports 1990-2015. http://hdr.undp.org/en/global-reports (accessed 3 June 2024)
78. [Стратегія ЄЕК ООН для освіти в інтересах сталого розвитку (2005). Одеса, Екологія, 44]. UNECE Strategy for ESD (2005). Odessa, Ecology, 44 [in Ukrainian].
79. UNESCO Almaty, 2018. Regional Synthesis Review on ESD.
80. UNESCO and France enhance Climate Change Education worldwide (2021). https://en.unesco.org/news/unesco-and-france-enhance-climate-change-education-worldwide (accessed 30 June 2024)
81. UNESCO and UNEP (1977). Tbilisi Declaration. Intergovernmental Conference on Environmental Education. Tbilisi, USSR 74 - 26 October 1977. https://www.gdrc.org/uem/ee/tbilisi.html
82. UNESCO (1975). The Belgrade Charter: a framework for environmental education, 1975. International Workshop on Environmental Education. https://www.eusteps.eu/wp-content/uploads/2020/12/Belgrade-Charter.pdf
83. UNESCO (2012). Shaping the Education of Tomorrow. 2012 Report on the UN Decade of ESD, Abridged. 12. https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/919unesco1.pdf (accessed 28 June 2024)
84. UNESCO (2015). International Standard Classification Of Education. Fields of education and training 2013 (ISCED-F 2013) – Detailed field descriptions. http://dx.doi.org/10.15220/978-92-9189-179-5-en
85. UNESCO (2016). Education 2030. Incheon Declaration and Framework for Action: towards inclusive and equitable quality education and lifelong learning for all. http://uis.unesco.org/sites/default/files/documents/education-2030-incheon-framework-for-action-implementation-of-sdg4-2016-en_2.pdf
86. UNESCO (2021). Learn for Our Planet: A Global Review of How Environmental Issues are Integrated in Education. United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organisation, Paris, France. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000377362
87. UNESCO. ESD. https://en.unesco.org/themes/education-sustainable-development (accessed 15 January 2025)
88. UNESCO. Institute for Statistics. http://tcg.uis.unesco.org/wp-content/uploads/sites/4/2020/09/Metadata-4 (accessed 21 January 2025)
89. UNESCO-EPD (1997). Declaration of Thessaloniki. International Conference Environment and Society: Education and Public Awareness for Sustainability. Thessaloniki, Greece 8-12 December. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000117772
90. United Nations Ukraine. The Sustainable Development Goals in Ukraine. https://ukraine.un.org/en/sdgs (accessed 28 June 2024)
91. United Nations (1972). Report of The United Nations Conference on The Human Environment, Stockholm. http://www.un-documents.net/aconf48-14r1.pdf
92. United Nations (1987). Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf
93. United Nations (1992a). Resolution adopted by the General Assembly. Documents Gathering a body of global agreements. General Assembly. http://www.un-documents.net/a47r191.htm (accessed 20 April 2021)
94. United Nations (1992b). Agenda 21. United Nations Conference on Environment & Development, Rio de Janerio. https://www.un.org/en/conferences/environment/rio1992
95. United Nations (2015). The Millennium Development Goals Report 2015, NewYork. https://www.un.org/millenniumgoals/2015_MDG_Report/pdf/MDG%202015%20rev%20(July%201).pdf
96. United Nations, Economic and Social Council (2019). Long-term strategy for the Convention until 2030. ECE/CP.TEIA/38/Add.1 https://documents.un.org/doc/undoc/gen/g19/069/95/pdf/g1906995.pdf
97. United Nations. Department of Economic and Social Affairs. Sustainable Development. The 17 Goals. https://sdgs.un.org/ (accessed 3 September 2024)
98. United Nations. High-level Political Forum on Sustainable Development. OHCHR and the 2030 Agenda for Sustainable Development. https://www.ohchr.org/en/sdgs/high-level-political-forum-sustainable-development (accessed 12 Desember 2024)
99. United Nations. Open Working Group proposal for Sustainable Development Goals. Sustainable Development. https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/1579SDGs%20Proposal.pdf
100. United Nations. Sustainable Development Goals. https://www.ua.undp.org/content/ukraine/en/home/sustainable-development-goals.html (accessed 27 September 2024)
101. Uzhhorod National University. https://www.uzhnu.edu.ua/en/ (accessed 8 June 2024)
102. V.N. Karazin Kharkiv National University. https://www.univer.kharkov.ua/en (accessed 9 June 2024)
103. Vasyl Stefanyk Precarpathian National University. https://pnu.edu.ua/en/ (accessed 8 June 2024)
104. Vincent, S., Mulkey, S. (2015). Transforming US the higher education to support sustainability science for a resilient future: the influence of institutional administrative organization. Environ. Dev. Sustain. 17 (2), 341–363
105. Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University. http://en.chnu.edu.ua/ (accessed 8 June 2024)

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Інтеграція концепції сталого розвитку в географічну освіту: від глобальних перспектив до досвіду України

Катерина Сегіда [1]
д. геогр. н., професор, завідувач кафедри соціально-економічної географії і регіонознавства імені Костянтина Нємця,
[1] Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна;
Карла Софія Сантос Феррейра [2]
д. філософії з екологічних наук та інженерії, Інститут прикладних досліджень, Дослідницький центр природних ресурсів, навколишнього середовища та суспільства (CERNAS),
[2] Політехнічний інститут Коїмбри, Бенканта, Коїмбра, Португалія;
Наталія Гусєва [1]
к. геогр. н., доцент кафедри соціально-економічної географії і регіонознавства імені Костянтина Нємця;
Катерина Кравченко [1]
к. геогр. н., доцент кафедри соціально-економічної географії і регіонознавства імені Костянтина Нємця;
Людмила Ключко [1]
к. геогр. н., доцент кафедри соціально-економічної географії і регіонознавства імені Костянтина Нємця;
Ганна Кучерява [3]
к. геогр. н., декан факультету туризму, бізнесу і психології,
[3] Київський національний лінгвістичний університет, Київ, Україна;
Ольга Суптело [1]
д. філософії з наук про Землю, доцент кафедри соціально-економічної географії і регіонознавства імені Костянтина Нємця;
Євгенія Телебєнєва [1]
к. геогр. н., доцент кафедри соціально-економічної географії і регіонознавства імені Костянтина Нємця

Сьогодні суспільство стикається з низкою надзвичайно гострих проблем, які не вдається розв'язати навіть у розвиненому світі. Особливо гостро постають проблеми у взаємодії системи «суспільство – економіка – природа». Глобальні трансформації, що відбуваються в суспільстві та пов'язані з подоланням системних криз і суперечностей, а також перехід людства до нового шляху цивілізаційного розвитку, потребують еволюції політики сталого розвитку та стратегій освіти. Географія має стати ядром, основою освітнього стандарту освіти в інтересах сталого розвитку, оскільки вона за своєю суттю є міждисциплінарною і охоплює знання, концепції та компетенції щодо природи й суспільства. Враховуючи сучасні тенденції реформування системи освіти в Україні, зокрема вищої освіти, невизначене місце географії в системі знань вимагає пошуку шляхів трансформації освітніх програм і навчальних планів із посиленням практичної підготовки та акцентом на формуванні компетенцій, затребуваних на ринку праці, що потребує застосування комплексного міждисциплінарного підходу. Мета статті – визначити ключові особливості освіти в інтересах сталого розвитку у світі та, зокрема, в Україні, шляхом аналізу літератури (наприклад, документів глобальних форумів і конференцій, освітніх програм та нормативних актів), що стосуються та обґрунтовують питання освіти для сталого розвитку. У роботі висвітлено міжнародні практики в цій галузі, досліджено потенціал географічної освіти для сталого розвитку та окреслено роль географічної освіти на всіх рівнях освітньої системи з перспективи сталого розвитку. Фокус на Україні є особливо актуальним через трансформацію її освітньої системи та рух у напрямку європейської інтеграції. Розглядається освіта для сталого розвитку в Україні через аналіз матеріалів глобальних форумів та найкращих світових практик. Визначено потенціал географічної освіти у просуванні сталого розвитку та оцінено впровадження освітніх програм в Україні. Підкреслюється важливість суспільної географії, методологія якої відповідає потребам освіти для сталого розвитку. Освіта як найбільша соціальна система, що формує суспільну свідомість, повинна впроваджувати цінності сталості за межами формального навчання для стимулювання етичного та соціокультурного прогресу. У вищій освіті України географія має бути визнана базовою дисципліною для всіх спеціальностей, що відповідає міжнародним стандартам освіти для сталого розвитку. Ігнорування принципів сталості в освіті несе ризик закріплення невирішених глобальних, регіональних та локальних проблем.

Ключові слова*: освіта в інтересах сталого розвитку, цілі та завдання сталого розвитку, географічна освіта, суспільна географія, освітні компетенції для сталого розвитку, система освіти, освітні програми, Україна.*

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу
Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 20 квітня 2025 р.
Прийнята 17 жовтня 2025 р.

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-29
UDC 553.048:553.6(477.83)
Received 9 July 2025
Accepted 23 October 2025

Raw material base of crushed stone and rubble stone in Khmelnytskyi Region

Myroslav Syvyi [1]
DSc (Geography), Professor of the Department of Geography and Methods of its Teaching,
[1] Volodymyr Hnatiuk Ternopil National Pedagogical University, Ternopil, Ukraine,
e-mail: syvyi@ukr.net, https://orcid.org/0000-0002-3150-4848;
Petro Demyanchuk [1]
PhD (Geography), Associate Professor at the Department of Geography and Methods of its Teaching,
e-mail: dempetrom@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-4860-7808;
Igor Kholoshyn [2]
PhD (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Head of the Department of Geography and Methods of its Teaching, [2] Kryvyi Rih State Pedagogical University, Kryvyi Rih, Ukraine,
e-mail: k_egeography@kdpu.edu.ua, https://orcid.org/0000-0002-2174-5605;
Natalia Panteleeva [2]
Assistant Lecturer, Department of Geography and Methods of its Teaching,
e-mail: panteleeva4y@kdpu.edu.ua, https://orcid.org/0000-0001-6787-2266

ABSTRACT

Problem Statement. Analysis of the "Geoinform" archival materials indicates that the reserve of explored raw material deposits for crushed stone and rubble stone in Khmelnytskyi Region (that are suitable for operation based on the magnitude of reserves, environmental conditions, logistical requirements, etc.) is practically exhausted. Exploration work is not being conducted, the capacities of operating mining enterprises are far from fully utilized, and predominantly small-volume deposits are available for development. Therefore, there is an urgent need for a critical analysis of the current state of the raw material base for rubble and crushed stone in the Khmelnytskyi Region. This is especially crucial given that in the post-war period, the demand for increasing their production volumes will sharply rise for restoring housing and destroyed infrastructure.

Presentation of the Main Material. The article analyzes the current state of research into deposits of raw materials for crushed stone and rubble production in the Khmelnytskyi Region. It shows the correlation of deposits with specific stratigraphic subdivisions and clarifies the general patterns of placement for various types of building stone deposits across the region. The degree of exploration of building stone deposits and their level of industrial development are analyzed. The territorial density (saturation of the territory) and the provision of explored reserves to the population of territorial units are calculated. The dynamics of raw material extraction in recent years are shown, and proposals for increasing extraction volumes in the region are presented.

The areas occupied by active quarries under productive lands, unproductive lands, and forest areas have been identified. It's concluded that the placement of a significant number of explored raw material reserves in the region on unproductive lands creates favorable prospects for their future development.

Analysis of raw material extraction volumes at state and commercial enterprises in the region, the assortment of their products, and the long-terms of provision with reliable reserves allowed us to conclude that overall, the volumes of raw material extraction in the region are satisfactory, even compared to pre-war years. However, there is insufficient provision of reliable reserves for some active quarries, extraction is concentrated in just a few territorial communities, and many enterprises are insufficiently utilized compared to their design capacities.

Conclusions. The article establishes patterns in the location of various types of crushed stone and rubble raw materials across the region. Calculations were made for the territorial density of explored reserves, their provision to individual administrative units, and the placement of explored deposits on productive, unproductive, and forest lands. Current volumes of raw material extraction and the provision of reliable reserves for active quarries have been determined, and possibilities for genuinely increasing raw material extraction in the region have been recommended.

Keywords: *Khmelnytskyi Region, building stone, deposits, igneous rocks, sedimentary rocks, raw materials, territorial communities, territorial density, resource provision, extraction.*

In cites: Syvyi Myroslav, Demyanchuk Petro, Kholoshyn Igor, Panteleeva Natalia (2025). Raw material base of crushed stone and rubble stone in Khmelnytskyi Region. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 398-410. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-29

Problem Statement. Podillia region generally, and the Khmelnytskyi Region specifically, are characterized by a relatively good supply of raw materials for producing construction materials, including building stone. These are primarily sedimentary and magmatic rocks, mainly used for crushed stone production and, to a lesser extent, dimension stone. In recent years, exploration for these raw materials has virtually halted, largely due to a lack of centralized funding. Now, exploration relies entirely on private investors. The reserve fund of thoroughly explored and officially registered deposits, as accounted for by the State Balance of Resources, is dwindling. There are hardly any large-volume, explored deposits remaining. Most of the available deposits are small and economically unviable to develop. On the

© Syvyi Myroslav, Demyanchuk Petro, Kholoshyn Igor, Panteleeva Natalia, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

other hand, the design capacities of active mining enterprises (quarries) are far from fully utilized, and the operational lifetimes of others are nearing their end. Civil and military infrastructure damages caused by the Russian-Ukrainian war, along with the inevitable need for extensive post-war restoration works, dictate the necessity of increasing the extraction volumes of construction raw materials, including building stone – a natural resource for crushed stone production. In view of the above, it is necessary to analyze the existing raw material base for building stones in the Khmelnytskyi Region, determine the needs of individual administrative units (districts, territorial communities) for various types of construction raw materials, and study the possibilities for expanding its extraction and rational (efficient) use.

Analysis of Publications on the Topic of the Article. Specialized publications that extensively cover the issue at hand are practically absent. The general overview of the region's valuable minerals can be found in the monograph edited by K. Herenchuk titled "Nature of Khmelnytskyi Region", published back in 1980 [18]. A more detailed review of the region's mineral resource potential can be found in monographs by M. Syvyj, "Mineral Resources of Podillia" [23], and by M. Syvyi, B. Havryshok, P. Demyanchuk, "Mineral Raw Material Potential of Khmelnytskyi Region: Current State of Development and Prospects" [24], along with articles [30, 31]. The availability of raw materials for the production of building stones in specific regions of Ukraine in different years, to a certain extent, has also been discussed in publications by V. Burka [2], V. Mykhailov [12], K. Kilinska, V. Kostashchuk [9], V. Petruk et al. [17], and H. Rudko et al. [21, 22] and others. Methodological Issues of Studying Mineral and Raw Material Resources and Complexes of Ukrainian Regions have been addressed in works by V. Mishchenko [14, 15], L. Rudenko et al. [19, 20], H. Rudko, Ye. Yakovliev [22], and H. Rudko, Ye. Ivanov, I. Kovalchuk [21]. Regional features of mineral resource complexes of Ukraine with varying degrees of detail and emphasis on economic-geographical, geo-environmental, economic, and other aspects are covered in the works of A. Vasylenko [3, 4], K. Kilinska, V. Kostashchuk [9], V. Petruk et al. [17], M. Syvyi, B. Havryshko, P. Demyanchuk [24] and others.

The provision of **raw materials for building stones** in certain regions of Ukraine over different years has also been highlighted in publications by V. Burka [2], O. Heleta [6], M. Korzhniev, M. Kurylo [10], V. Kostashchuk [11], and others.

In publications by foreign authors such as T. Elyoufut, F. Alkhomaidat [27], Ch. Myriounisa et al. [28], K. Szamalek, K. Zglinicki, S. Mazurek [32], Schrenk S. [29] and others, research on this issue predominantly focuses on purely applied directions. For instance, detailed studies of the quality characteristics of building stone to determine its application areas, microscopic studies of the structure of various types of building stone, investigations into the impact and interaction of natural stone with the environment, examples of the efficiency and range of natural stone use in different regions and countries worldwide, and more.

Aims and Objectives. The following objectives were planned for the study: 1) to provide a brief description of the rocks suitable for use as building stone in Khmelnytskyi Region; 2) to characterize the degree of exploration and the territorial distribution of building stone deposits; 3) to calculate the resource security of individual administrative units (districts, territorial communities) with the reserves of the explored raw materials; 4) to draw conclusions regarding the opportunities for expanding the extraction and efficient utilization of building stone in the Khmelnytskyi Region.

The study aimed to address the following objectives: 1) To provide a concise characteristic of rocks suitable for use as building stone in Podillia and specifically in Khmelnytskyi Region; 2) To characterize the degree of exploration and territorial distribution of building stone deposits; 3) Calculate the provision of this type of raw material to the administrative units of the region; 4) To analyze the departmental affiliation of developed deposits and their provision with explored raw material reserves; 5) To draw conclusions about the possibilities of expanding extraction and efficient use of building stone in the region.

The main **research materials** were primarily data drawn from various sources of the State Scientific and Production Enterprise "Geoinform of Ukraine" [7, 13], including from the "Balance" database as of 01.01.2022 (Khmelnytskyi Region) [26], interactive maps of mineral deposits, archival materials from geological exploration organizations, and others, which were available for public use only until 2022. For these reasons, the article's conclusions about the state of the raw material base for building stone in the region cover only the pre-war period. The work utilized traditional methods of analytical processing of statistical information and construction of cartographic models: historical-geographical approach, comparison, systematic analysis, cartographic, statistical, sociological, field observations, etc.

Results and Discussion. Building materials enterprises (quarries, plants) produce products in the form of artificial and crushed stone. Artificial stone refers to products of a specific shape processed by splitting, dressing, and cutting natural stone (facing,

wall, curb stones, slabs, paving stones, facing tiles).

Rubble stone consists of irregularly shaped fragments generated from blasting operations, as well as waste material from processing blocks and slabs. When crushed, rubble stone yields crushed stone, grits, and manufactured sand.

The quality of building stone is primarily determined by its physical and mechanical characteristics, including compressive strength in dry and water-saturated conditions, granularity, abrasion resistance, viscosity, frost resistance, volume and bulk density, and water absorption.

There is a range of requirements [25] for rock types used as rubble stone. Rubble stone is utilized for laying foundation walls, constructing building blind areas, reinforcing earth slopes, road works, and as an aggregate in rubble concrete.

However, the main bulk of building stone is actually used for crushed stone production, which serves as an aggregate in concrete and for road construction needs. The suitability of various rock types for producing crushed stone of different purposes is regulated by a series of state standards [16].

The quality of crushed stone is determined by indicators such as grain and petrographic composition, strength, frost resistance, content of weak rock grains, and impurities of dusty, clayey, and silty particles.

The highest quality raw materials for crushed stone production are uniformly grained igneous rocks like gabbro, basalts, granites, granodiorites, andesites, etc. They yield a small amount of waste and are strong and frost-resistant. Metamorphic rocks, widely developed in Podillia – gneisses and migmatites – are somewhat inferior in quality, mainly due to the presence of subparallel banded orientation of dark-colored minerals, which leads to increased waste.

Sandstones are often layered, which reduces their resistance to weathering and, consequently, lowers the quality of gravel; they produce a lot of waste and require washing. Limestones are susceptible to dissolution, leading to the formation of karst voids and cavities with reduced hardness. These voids are often filled with clay, which negatively affects the quality of gravel. Shell limestones generally do not meet the requirements for rubble stone raw material and are suitable, at best, for low-strength gravel or ballast materials.

Currently, in Ukraine, approximately 95% of extracted building stone is processed into rubble. As of January 1, 2022, the State Balance of Mineral Resources of Ukraine includes 946 deposits, out of which 428 are being exploited by the industry. Building stone deposits comprise more than 40 types, including granites, migmatites, gneisses, limestones, sandstones, pegmatites, quartzites, gypsum, andesite, diorites, basalts, etc. [10]. In 2020, the majority of building stone was extracted in the Zhytomyr Region – 21.73%, Khmelnytskyi Region – 13.90%, and Rivne Region – 12.58%. Compared to 2019, raw material extraction increased in all regions except Donetsk and Lviv regions. The most significant increase in extraction volumes compared to 2019 occurred in the Khmelnytskyi and Luhansk regions – nearly 5 times in both regions [7, 13].

Magmatic and metamorphic rocks of the Archean and Proterozoic eras are associated with the Ukrainian Shield. Sandstones are located on the northern and southeast edges of the shield, while western and southern slopes consist of Paleogene and Neogene limestone formations.

The leading consumer of gravel is the industry producing commercial concrete. Pro-Consulting analysts conducted a study of the gravel market in Ukraine [1].

After the crisis observed in 2014–2016, enterprises involved in the production (extraction) of crushed stone have been gradually updating their technological equipment and improving the quality of crushed stone (specifically cuboid-shaped), which is in high demand in modern construction. Ukraine possesses high potential for the production and export of crushed stone. Given continued state and international support for road construction and repair, the crushed stone market is expected to continue its development. The production of crushed stone and its prices are constantly rising, indicating positive development prospects and opportunities for expanding production and sales in the domestic market [1].

In the Podillia region, natural stone building materials consist of crystalline Precambrian rocks of the platform foundation, such as granites, granodiorites, charnockites, migmatites, gneisses, and sedimentary rocks of the cover, including limestones, dolomites, and sandstones.

Crystalline Precambrian rocks are widespread in the territory of Vinnytsia and the northeastern part of Khmelnytskyi Regions. Their western boundary of development roughly passes through Shepetivka – Hrytsiv – Starokostyantyniv – Medzhybizh – Derazhnia – Vovkovyntsi [23].

The rocks are exposed in river valleys and ravines, forming various outcrops, dome-shaped elevations, or sometimes continuous extensive formations (up to 1 km or more). In Khmelnytskyi Region, they lie directly beneath a small thickness of Quaternary and partially Neogene deposits.

Gneisses are found in only two deposits in the Khmelnytskyi Region (Klymentovytske and Hrytsivske). They are often encountered as xenoliths and lenses among younger crystalline rocks. These

rocks are dark gray to black in color, fine-grained, often with a schistose texture, significantly reducing their physical and mechanical properties [24].

Silurian limestones are widespread exclusively in the southeastern areas of Ternopil and southwestern areas of Khmelnytskyi Regions, exposed in the valleys of the Dniester, Seret, Nichlava, Zbruch, Zhvanchyk, Smotrych, Studenytsia, and Ushytsia rivers. The depth of limestone occurrence varies from 0 to 80 m, with a total thickness of 50–60 m. Limestones are mostly gray, dark gray, dense, fissured, often platy, and granular. Fine-grained and hidden-crystalline varieties of limestones, which exhibit sufficiently high compressive strength in an air-dry state, are used as raw materials for producing rubble stone and crushed stone for road and residential construction.

Miocene limestones are known in the southwestern part of Vinnytsia Region, in the central, southern, and southwestern parts of Khmelnytskyi Region, as well as within the Tovtry Ridge in Ternopil Region. They are represented by light-gray, light-yellow, chertaceous, serpulid, detrital, or oolitic varieties, often with strong recrystallization, and sometimes softer variants, relatively pure in chemical composition. These rocks are typically found at depths of 0–15 meters, with thickness ranging from 3 to 20 meters, and up to 100 meters or more within the Tovtry Ridge. The softer varieties are primarily used as carving stone and for lime production, while the dense recrystallized ones are used for producing rubble stone and gravel.

Devonian dolomites are found in the Slobidka-Rykhtivske deposit in the Kamianets-Podilskyi district of Khmelnytskyi Region. Although the reserves of the Slobidka-Rykhtivske deposit are limited, the dolomites are suitable for producing rubble stone and gravel for construction works, as ballast layers for road foundations, and as fillers for road concretes. However, this deposit is not being exploited [24].

In Khmelnytskyi Region, there are also 5 previously explored deposits of granitoids and limestones, with reserves estimated in categories $C_1 + C_2$ and considered insignificant. In general, there are only 4 large deposits of building stone known in Podillia (with reserves exceeding 30 million cubic meters): one of them (Polonske) is located in Khmelnytskyi Region. There are 14 deposits with medium-sized reserves (15–30 million cubic meters), all of which are situated in Khmelnytskyi and Vinnytsia Regions. All other building stone deposits in Podillia are considered small (reserves less than 15 million cubic meters).

Figure 1 illustrates the distribution of building stone deposits in Khmelnytskyi Region. The diagram clearly highlights the areas of concentration of deposits of magmatic and metamorphic rocks – the southwestern slope of the Ukrainian Shield and, correspondingly, the northeastern territories of the region.

The strip of Neogene-age limestone deposits is generally oriented in a southeast-northwest direction. It can be traced in the Kamianets-Podilskyi district (Nova Ushytsia, Dunaivtsi, Smotrych, Slobidka-Kulchiyevetska, Kamianets-Podilskyi, Humentsi, Horodok, Sataniv territorial communities) and continues within the Tovtry Ridge. Only in the southwestern territorial communities of the Ternopil Region is there a rather significant concentration of Silurian-age limestone deposits.

In the region, 48 deposits of raw materials for rubble stone and crushed stone production have been extensively explored and included in the balance with total reserves exceeding 337 million cubic meters. Out of these, 24 deposits with reserves exceeding 213 million cubic meters are currently being exploited [26]. The raw materials come from deposits of granitoids, limestones, dolomites, and sandstones. The majority of the reserves are concentrated in granitoid deposits (over 72%), mainly consisting of granites, as well as charnockites, gneisses, granodiorites, and migmatites.

There are slightly more limestone deposits in the region than granitoids (27 and 21, respectively), but their combined reserves are significantly lower (about 27% of the total). Eleven limestone deposits and thirteen granitoid deposits are currently being exploited. The only detailed explored dolomite deposit in the region (Slobidsko-Rykhtivske in Zhvanets territorial community) has limited reserves and is not currently being developed.

Additionally, there are 5 previously explored deposits in the region with minor reserves (about 3.5 million cubic meters), two of which are under exploitation. In the Chemerivtsi territorial community, one deposit is being exploited with unexplored reserves.

One granitoid deposit (Polonske) with reserves exceeding 30 million tons is classified as large, and six are considered medium-sized (Kamianets-Podilskyi (part Pudlivtsi), Malo-Novoselytske, Klymentovytske, Konotopske, Rudnia-Novenske, and Rudnia-Novenske-1) with reserves ranging from 15 to 30 million tons. Most of them are located in the northeastern territorial communities of the region.

Figure 2, which demonstrates the availability of raw materials for the administrative units of the region and their distribution density, clearly reveals the concentration of the main building stone bases in the northeastern and southwestern areas of the region.

The highest provision with raw materials is observed in territorial communities (TCs) such as Mykhailiuchka, Medzhybizh, and Polonne (respectively, 5680, 3080, and 2770 cubic meters per person), with slightly lower figures in Letychiv (2520 cubic meters per person) and Slobidka-Kulchieve-

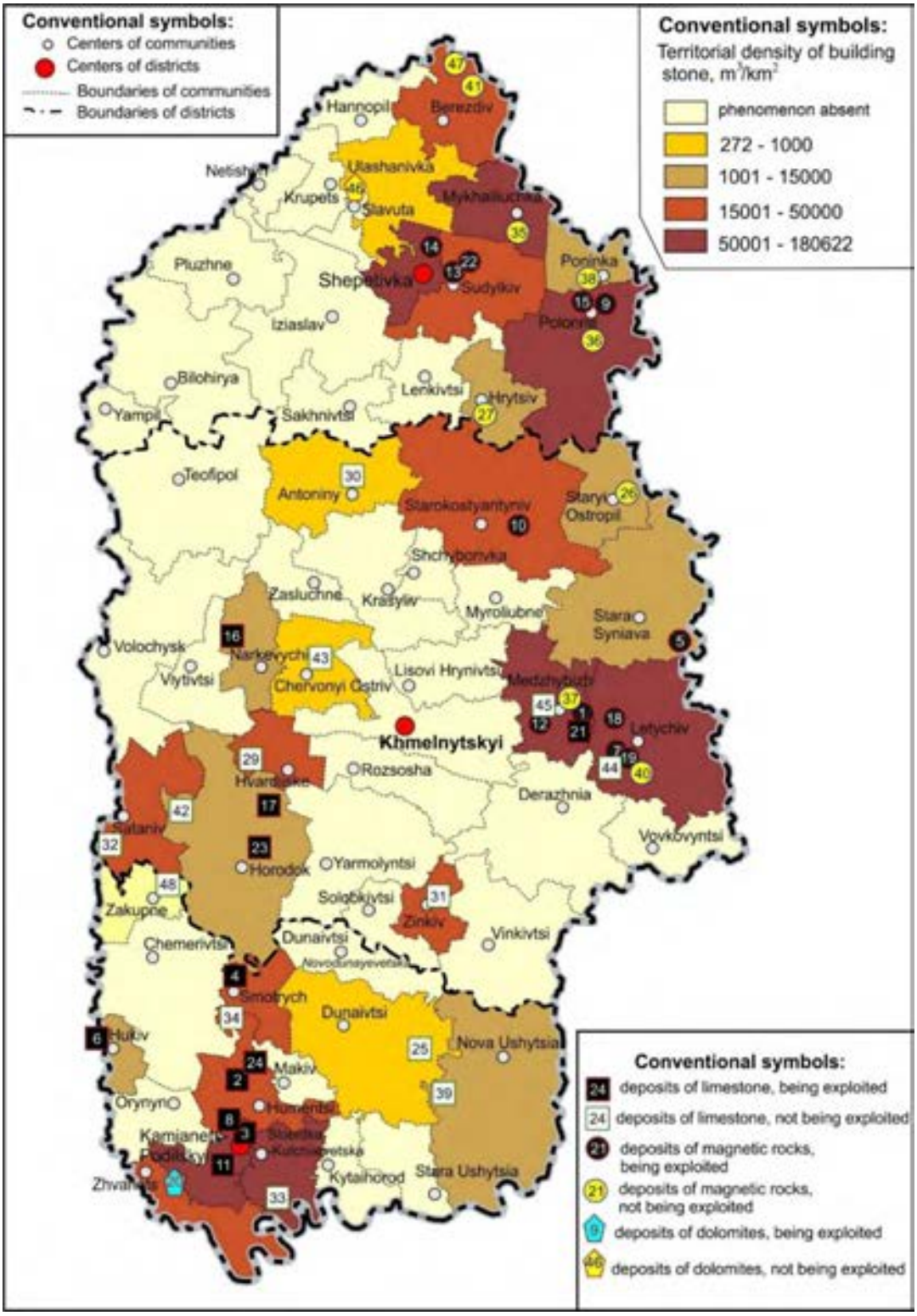


Fig. 1. Location of building stone deposits on the lands of territorial communities in Khmelnytskyi Region (compiled by the authors)

Exploited deposits: *1 – Holovchynetske, 2 – Kyselivske, 3 – Kamianets-Podilskyi, 4 – Smotrytske, 5 – Novosyniavske, 6 – Dolynivske, 7 – Rudnia-Novenske 1, 8 – Kamianets-Podilskyi (Pudlivetske), 9 – Polonske, 10 – Krasnosilkivske, 11 – Kubachivske, 12 – Rusanivetske, 13 – Sudylkivske, 14 – Klymentovytske, 15 – Polonske 2, 16 – Bubnivske, 17 – Kovalivske, 18 – Markivetske, 19 – Rudnia-Novenske, 20 – Slobidsko-Rykhtivske, 21 – Holovchynetske (part 1), 22 – Sudylkivske 1, 23 – Matviykivetske, 24 – Nihynsko-Verbetske.*

Untapped deposits: *25 – Katerynivske, 26 – Ostopilske, 27 – Hrytsivske, 28 – Demkivetske, 29 – Zhuchkovetske, 30 – Zakrynychanske, 31 – Zinkivetske, 32 – Ivankivetske, 33 - Kamianets-Podilskyi (Ustivske), 34 – Karachkivetske, 35 – Konotopske, 36 – Malo-Novoselivske, 37 – Medzhybiske, 38 – Poninkivske, 39 – Tymkivske, 40 – Trebukhovetske, 41 – Trostianetske, 42 – Turchynetske, 43 – Antonivske, 44 – Terlivske, 45 – Stavnytske, 46 – Ulashanivske, 47 – Mukharivske, 48 – Pivdenno-Zakupnianske.*

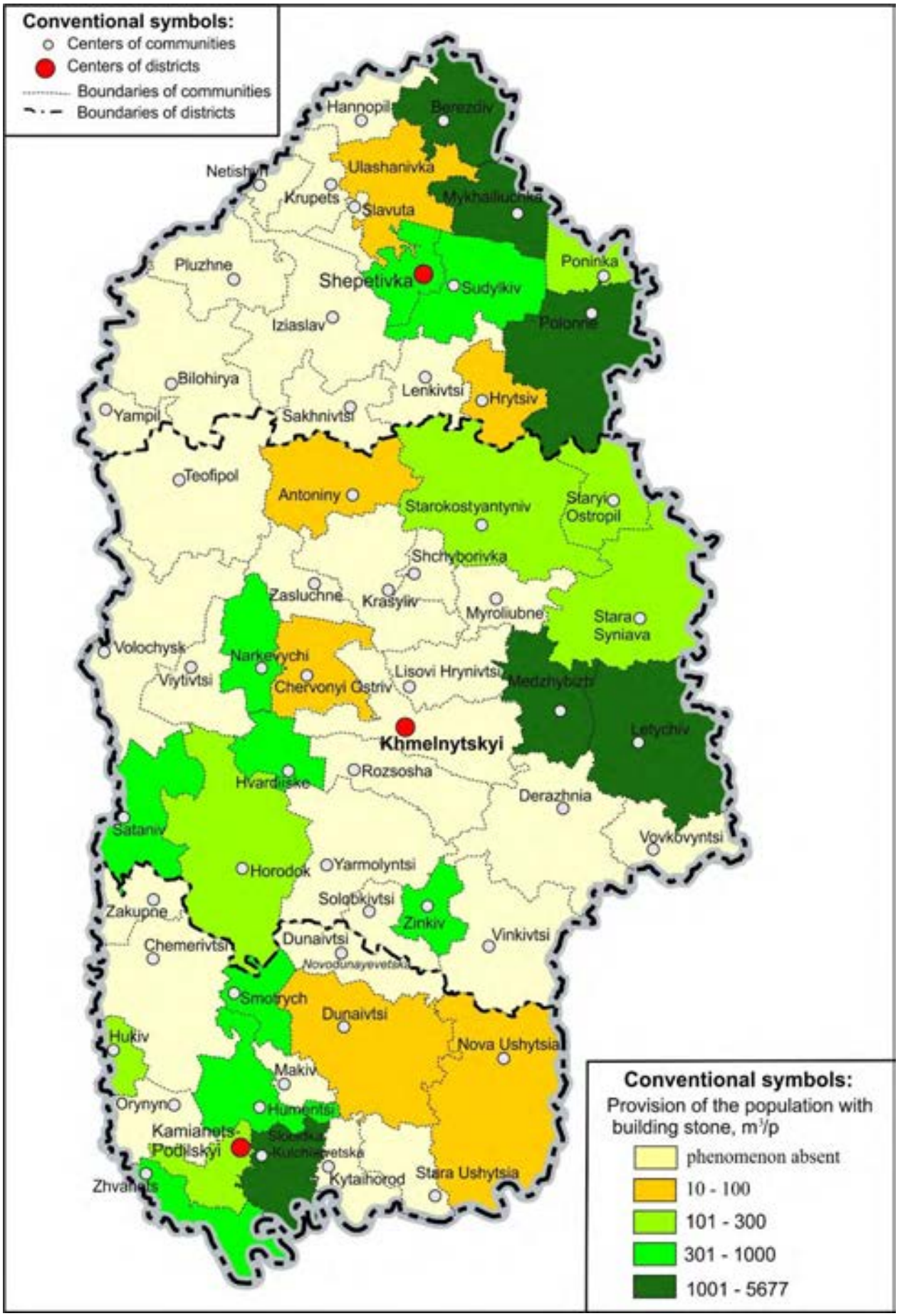


Fig. 2. Provision of territorial communities of Khmelnytskyi Region with building stone reserves (compiled by the authors)

tska TC (2260 cubic meters per person). In Smotrych, Humentsi, Sudylkiv, Zinkiv, Sataniv, Shepetivka, Hvardiyske, Narkevychi, and Kamianets-Podilskyi TCs, the provision ranges approximately from 300 to 800 cubic meters per person. All other TCs are either not provided or almost not provided with this type of raw material.

A similar pattern is demonstrated in the density of raw material distribution across the region: the highest figures are characteristic of Kamianets-Podilskyi and Polonne territorial communities (TCs) (180,620 and 146,210 cubic meters per square kilometer, respectively). In Letychiv, Slobidka-Kulchievetska, Mykhailiuchka, Shepetivka, Medzhybizh, Smotrych, and Humentsi TCs, the density ranges from 30,000 to 110,000 cubic meters per square kilometer. In Starokostantyniv, Sataniv, Berezdiv, Sudylkiv, Hvardiyske, Zinkiv, and Narkevychi TCs, the density is between 10,000 and 30,000 cubic meters per square kilometer, while in other communities, this figure is lower than 10,000 cubic meters per square kilometer.

The total area of building stone deposits located on productive arable land in the region is 156 hectares, accounting for about 16% of the total deposits. The area of currently exploited deposits is 66 hectares. Most of the building stone reserves in the region are located on low-productivity non-arable land, occupying over 748 hectares, which constitutes more than 76% of the reserves [23]. Half of these deposits are currently being exploited, which can be considered a favorable circumstance. Additionally, about 8% of the reserves are situated in deposits under forest cover, covering approximately 125 hectares. Only a small portion of these deposits is currently being exploited. The majority of raw material reserves on productive land are located in Polonne, Kamianets-Podilskyi, and Letychiv TCs. Deposits situated in unsuitable or forested areas are found in Shepetivka, Slavuta, Starokonstantyniv, Horodok, and some other TCs. Overall, the presence of significant explored raw material reserves in non-productive lands in the region creates favorable prospects for their development in the future.

As of now, the exploitation of building stone deposits in Khmelnytskyi Region is carried out by several ministries and agencies, including OJSC State Joint Stock Company “Automobile Roads of Ukraine”, Ukragroprombud, State Corporation “Ukravtodor” (State Road Agency of Ukraine), as well as commercial entities such as LLC Shepetivskyy Hranitnyy Karyer “Proneks” (Shepetivka Granite Quarry “Pronex”), LLC Kamianets-Podilskyi Kombinat Budivelnykh Materialiv (Kamianets-Podilskyi Building Materials Plant), LLC Polonskyy Shchebenevyy Karyer (Polonne Crushed Stone Quarry), PJSC Podilski Tovtry and others [26].

The majority of building stone reserves in the region are under the balance of OJSC State Joint Stock Company “Automobile Roads of Ukraine”, which extracts granite from the Rusanivetske deposit and limestone from the Pudlivetske and Kubachivske deposits. State Corporation “Ukravtodor” exploits the Krasnosilske granite deposit in Starokostantyniv territorial community. Ukragroprombud, a cooperative-state corporation, extracts limestone from the Kyselivske deposit. A large deposit of gneiss and granodiorite, the Klymentovytske deposit in Shepetivka territorial community, falls under the jurisdiction of the Department for the Execution of Criminal Punishments under the Ministry of Justice of Ukraine. The reserves of these quarries are estimated to last for over 100 years. The significant Polonske granite and migmatite deposit is exploited by LLC Polonskyy Shchebenyevyy Karyer. The Rudnia-Novenske deposits, which are medium in terms of reserves, are developed by LLC Shepetivskyy Hranitnyy Karyer. Other smaller building stone deposits in the region are exploited by commercial entities.

Enterprises produce crushed stone for construction purposes. In 2021, Polonne plant produced 624,000 cubic meters of crushed stone, out of a planned capacity of 700,000 cubic meters, indicating a utilization rate of 90%. The Starokostiantyniv Special Quarry exceeded its planned production with 418,000 cubic meters of actual output compared to the planned capacity of 400,000 cubic meters. The quarries are supplied with explored reserves for over 30 years.

The highest extraction rates were recorded at the Holovchynetske (466,000 cubic meters), Krasnosilkivske (418,000 cubic meters), Polonske (204,000 cubic meters), and Polonske 2 (418,000 cubic meters) granite deposits. Extraction in smaller quantities also took place at the Smotrytske, Rusanivetske, Nihynsko-Verbetske, and other deposits.

At the Rusanivtsi Special Quarry, 138,000 cubic meters of raw materials were extracted. The product is construction crushed stone. The quarries are supplied with reserves for long-term operation.

Kyiv-based LLC “Kontur” won an auction for the sale of a special permit to use the Trostianetske granite deposit located in the Shepetivka district. The contract value amounts to 5.18 million hryvnias [24]. The maximum available area for deposit development is 30 hectares. Geological surveys covered an area of 12 hectares. The deposit is located in the Berezdiv territorial community.

In total, 2,192 thousand cubic meters of raw materials for crushed stone and rubble stone were extracted in the region in 2021. For comparison, in 1992, 2,828 thousand cubic meters of raw materials were extracted from explored balance reserves in the

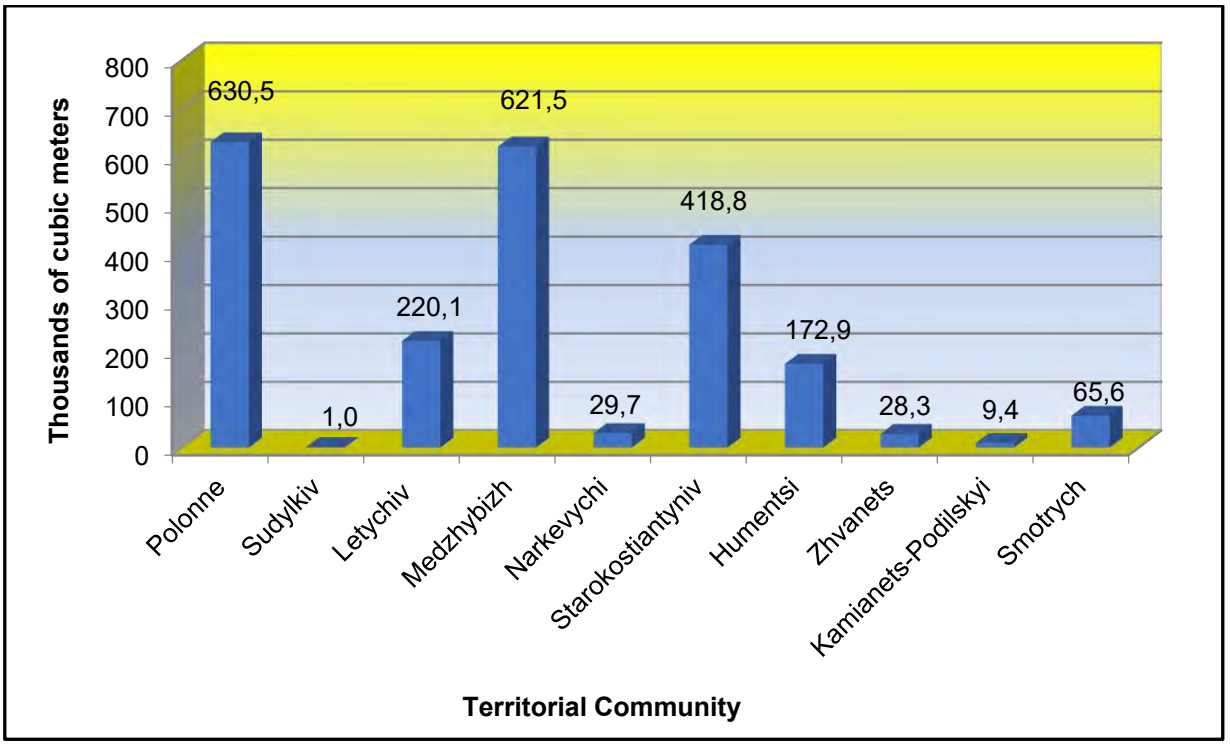


Fig. 3. Dynamics of building stone extraction by territorial communities in 2021 (compiled by the authors)

region, indicating a slight decrease in extraction. As seen in Figure 3, the main volumes of building stone extraction are concentrated in practically three territorial communities: Polonne, Medzhybizh, Starokostiantyniv, and partially in Letychiv and Humentsi, where deposits with significant reserves are exploited. In five other communities, the volumes of crushed stone raw material extraction are insignificant.

In the regions of the region where reserves have been explored, the volumes of raw material extraction have remained generally satisfactory in recent years. For example, in Shepetivka district, the extraction amounted to only 626 thousand cubic meters of raw materials out of the total projected capacity of quarries, which is 980 thousand cubic meters; in Khmelnytskyi – 1,244 thousand cubic meters, and in Kamianets-Podilskyi – 276 thousand cubic meters. However, many western and central territorial communities lack explored reserves of this type of building material and, consequently, do not carry out its extraction.

Expanding the extraction of building stone in the region can be achieved either by increasing the volumes in existing quarries in Shepetivka, Polonne, Letychiv, and some other territorial communities or by putting into operation the reserve explored deposits, of which there are 24 in the region. These include the large Ustivske, Malo-Novoselytske, and Konotopske deposits, the medium-sized Medzhybiske deposit, and smaller ones located in non-agricultural areas in close proximity to transportation routes (highways and railways).

According to expert forecasts, the granite market volume in Ukraine will continue to increase in the medium term. In the western regions of the country, granite is used more for construction and reconstruction of architectural structures and interior decoration, while in the east, it is used in the segment of ritual services and building cladding. The increasing demand will be met by domestic production while maintaining the current minimal level of imports. The price of domestic granite is also showing an upward trend due to inflation and rising wages [1].

As noted by D. Vasilyev [5], mitigating the shortage of building materials in the post-war period can be achieved by creating favorable conditions for the construction of new or restoration of damaged construction plants. For example, providing plots for free use for the first 2–3 years. Moreover, new plants can be exempted from community taxes for the initial period, receive preferential terms for utility connections, etc. Logistic needs can be partially addressed by creating attractive conditions for Western investors. If plants for the production of building materials appear in Ukraine, logistic routes will shorten, as well as logistic costs.

Conclusions

1. In the Khmelnytskyi Region, the natural stone building material base consists of crystalline Precambrian rocks of the platform foundation, including granites, granodiorites, charnockites, migmatites, and gneisses (a total of 21 deposits with total balance reserves of 236.48 million cubic meters), as well as sedimentary cover rocks such as

limestones, dolomites and sandstones (27 deposits with total balance reserves of 94,41 million cubic meters). Granitoids of the Ukrainian Shield are characterized by the largest explored reserves. The granitoids of the Ukrainian Shield are characterized by the largest explored reserves. Limestone deposits are mainly small, except for a few medium-sized ones concerning explored reserves (Pudlivetske, Ustivske, Kovalivske).

2. The main concentrations of magmatic and metamorphic rock deposits are located on the western slope of the Ukrainian Shield, falling within the boundaries of the northeastern territorial communities (TCs) of the region (Shepetivka, Mikhayliuchka, Sudylkiv, Polonne, Starokostiantyniv, and Letychiv). Conversely, limestone deposits are primarily concentrated in the southwestern part of the region within Sataniv, Horodok, Dunayivtsi, Humentsi, Kamianets-Podilskyi, Slobidka-Kulchiyevetska, and other TCs, and are associated with Silurian, Devonian, and Miocene deposits, particularly the Sarmatian formations of the Tovtry Ridge.

3. The territorial communities of Mikhailiuchka, Polonne, Shepetivka, Letychiv, and Kamianets-Podilskyi stand out significantly in terms of the explored industrial reserves of various raw materials for crushed stone production. Simultaneously, thirty territorial communities in the region completely lack explored deposits of these raw materials. In several other communities (Hrytsiv, Ulashanivka, Antoniny, Hvardiiske, Staryi Ostropil, Chornyi Ostriv, Hukiv, Zhvanets), only one small deposit has been explored, with reserves ranging from 100,000 to 400,000 cubic meters.

4. The availability of raw materials per capita and the density of their distribution clearly show the concentration of the main building stone bases in the northeastern and southwestern regions of the region. For instance, TCs such as Berezdiv, Mykhailiuchka, Polonne, Medzhybizh, Letychiv, and Slobid-ka-Kulchievetska have the best provision of explored building stone reserves (1,000–5,000 cubic meters per person). Shepetivka, Sudylkiv, Sataniv, Humentsi, Dunaivtsi, and Zhvanets TCs are slightly less provided (300–1,000 cubic meters per person). Other territorial communities in the region are either poorly provided or not provided at all.

5. Only 16% of the total explored reserves (156 hectares) are located on productive arable lands. The majority of building stone reserves (>76%) are situated on unproductive non-arable lands (approximately 748 hectares). The placement of a significant number of explored raw material reserves in unproductive lands creates favorable prospects for their future development, as it minimizes conflict with agricultural interests. The largest reserves of raw material on productive lands are located in Polonne, Kamianets-Podilskyi, and Letychiv territorial communities. Deposits located in unsuitable or forested areas are found in Shepetivka, Slavuta, Starokostiantyniv, Horodok, and some other territorial communities. Overall, the placement of a significant number of explored raw material reserves in unproductive lands in the region creates favorable prospects for their development in the future.

6. The exploitation of building stone deposits in the Khmelnytskyi Region is currently carried out by several ministries and agencies, as well as commercial entities. In total, 2,192,000 cubic meters of raw materials for crushed stone and rubble stone production were extracted in the region in 2021.

In the administrative units of the region endowed with explored reserves, the volumes of raw material extraction have remained generally satisfactory in recent years. However, many western and central territorial communities lack explored reserves of this type of building raw material and, consequently, do not engage in its extraction. The capacities of many active mining and extraction enterprises are used extremely unsatisfactorily, typically constituting a few percent. This situation is clearly explained by the current state of the building stones market, both in the region and in the country as a whole. Additionally, quarries often remain ownerless due to the complexity of obtaining licenses for opening new mining and extraction enterprises. The situation may change with a shift in the market conditions in the near future and the much-needed simplification of documentation for obtaining licenses. It can also be noted that the active quarries are supplied with explored reserves of raw materials for long-term periods.

7. Increasing the volumes of raw material extraction in the region can be achieved by maximizing design capacities at existing quarries in Shepetivka, Polonne, Letychiv, and other TCs, and by bringing into operation the 24 reserve explored deposits. These reserve deposits include large ones (Ustivske, Malo-Novoselytske, Konotopske), medium ones (Medzhybiske), and smaller ones located near major transportation routes on non-arable lands.

Bibliography

1. *Аналіз ринку щебеню в Україні (2019). Отримано з https://pro-consulting.ua/ua/issledovanie-rynka/analiz-rynka-shebnya-v-ukraine-2019-god*
2. *Бурка, В. Й. (2019). Територіальні форми зосередження будівельних копалин – важливий чинник формування будівельно-індустріальних комплексів. Науковий вісник Чернівецького університету: збірник наукових праць. Чернівці: ЧНУ ім. Ю. Федьковича. Серія: Географія, (808), 87–92.*

3. Василенко, А. П. (2023). Моніторинг ресурсної бази металічних, неметалічних та твердих горючих корисних копалин. Мінеральні ресурси України, (2), 17–19. https://doi.org/10.31996/mru.2023.2.17-19
4. Василенко, А. П. (2023). Проблеми поповнення Інвестиційного атласу надрокористувача достовірною інформацією про ресурси металічних та неметалічних корисних копалин. Мінеральні ресурси України, (4), 3–7. https://doi.org/10.31996/mru.2024.4.3-7
5. Васильєв, Д. (2023). Як війна змінила будівельний ринок. Українська правда. Отримано з https://www.epravda.com.ua/columns/2023/07/31/702741/
6. Гелета, О. (2008). Український ринок щебеню з природного каміння. Коштовне та декоративне каміння, 3 (53), 1–3.
7. Геоінформ України: офіційний вебсайт. Отримано з http://geoinf.kiev.ua/
8. Каміння будівельне. Портал даних видобувної галузі України. Отримано з https://www.eiti.gov.ua/resursi-rozvidka-ta-vidobuvannya/kaminnya-budivelne/
9. Кілінська, К., & Костащук, В. (2020). Мінерально-сировинні ресурси Чернівецької області: сучасний стан та перспективи використання. Чернівці: ЧНУ ім. Ю. Федьковича.
10. Коржнев, М. М., & Курило, М. М. (2007). Мінерально-сировинна база України в умовах глобалізації. Стратегічна панорама, (2), 14–21.
11. Костащук, В. І. (2006). Мінерально-сировинні ресурси адміністративних районів та особливості їх використання в ринкових умовах (на прикладі Чернівецької області). Природа Західного Полісся та прилеглих територій: Зб. наук. праць, (3). Луцьк: РВВ Вежа, 152–157.
12. Михайлов, В. (2024). Високоперспективні об'єкти мінерально-сировинної бази України. Ч. 2. Неметалічні корисні копалини. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія Геологія, 3 (106), 47–56. https://doi.org/10.17721/1728-2713.106.06
13. Мінеральні ресурси України: офіційний вебсайт. Отримано з http://minerals-ua.info.
14. Міщенко, В. С. (2007).Економічні пріоритети розвитку й освоєння мінерально-сировинної бази України. Київ: Наукова думка.
15. Міщенко, В. С. (2011). Програмне планування розвитку мінерально-сировинної бази України: методологія і практика. Київ: ДУ Інститут економіки природокористування та сталого розвитку НАН України.
16. Перелік діючих відомчих будівельних норм (ВБН), галузевих будівельних норм (ГБН), стандартів організацій України (СОУ) та інших документів у галузі будівництва та промисловості будівельних матеріалів станом на 01.04.2025 р. Отримано з https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=115276
17. Петрук, В. Г. Гавадза, С. В., Єрмаков, В. М. та ін. (2024). Аналіз перспектив постмайнінгу гірничорудних об'єктів та декарбонізації і екологізації мінерально-сировинних ресурсів Вінниччини. Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування: колективна монографія / за ред. проф. М. С. Мальованого. Київ: Ярославенко Я. В., 420–447. https://doi.org/10.51500/7826-56-8
18. Геренчук, К. І. (Ред.). (1981). Природа Хмельницької області. Львів: Вища школа.
19. Руденко, Л. Г., Палієнко, В. П., Байтала, В. Д. та ін. (2004). Підходи, принципи та методи конструктивно-географічних досліджень регіонального природокористування у зв'язку з розвитком мінерально-сировинної бази України. Український географічний журнал, (3), 13–17.
20. Руденко, Л. Г., Палієнко, В. П., Барщевський, М. Є. та ін. (2005). Проблеми природокористування в гірничодобувних районах України. Український географічний журнал,(3), 18–23.
21. Рудько, Г. І. Іванов, Є. А., & Ковальчук І. П. (2019). Гірничопромислові геосистеми Західного регіону України: монографія, (2). Київ-Чернівці: Букрек.
22. Рудько, Г. І., & Яковлєв, Є. О. (2020). Постмайнінг гірничодобувних районів України як новий напрям екологічно безпечного використання мінерально-сировинних ресурсів. Мінеральні ресурси України, (3), С. 37–44. https://doi.org/10.31996/mru.2020.3.37-44
23. Сивий, М. (2004). Мінеральні ресурси Поділля: конструктивно-географічний аналіз і синтез: монографія. Тернопіль: Підручники і посібники.
24. Сивий, М. Гавришок, Б., & Дем'янчук, П. (2023). Мінерально-сировинний потенціал Хмельниччини: сучасний стан освоєння, перспективи. Тернопіль: Вектор.
25. Технічні умови на камінь бутовий. Асоціація виробників будівельних матеріалів України: офіційний вебсайт. Отримано з https://avnbmu.com.ua/tehnichni-umovy-na-kaminy-butovyj/
26. Хмельницька область. Стан мінерально-сировинної бази (за даними бази даних "Баланс" на 01.01.2022 р. (2022). Київ: ДНВП Геоінформ України.
27. Elyoufut, T. & Alkhomaidat, F. (2021). Evaluation of the characteristics of natural building stones using ultrasonic inspection techniques. Arab J Sci Eng., (46), 11415–11424. https://doi.org/10.1007/s13369-021-05825-y
28. Myriounis, Ch. Varras, G. Tsirogiannis, I. & Pavlidis, V. (2015). Usage of stone materials in natural and human environment, case study in Epirus, Greece. Agriculture and Agricultural Science Procedia, (4) 431–439. https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.03.049
29. Schrenk, S. (2024). The Impact of Choosing Natural Stones as a Building Material on Sustainability and the Environment. Blog: From the Bedrock. Отримано з https://blog.polycor.com/the-impact-of-choosing-natural-stones-as-a-building-material-on-sustainability-and-the-environment
30. Syvyj, M. Mazbayev, O. Volik, O., Panteleeva, N., & Hanchuk O. (2021). Methodological approaches to the study of mineral resource potential of regions. Second International Conference on Sustainable Futures: Environmental,

Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2021). E3S Web of Conferences, 280, Article 11012. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128011012

31. *Syvyj, M. Ivanov, Y., & Panteleeva N. (2023). The problem of rational use of mineral resources and mining waste in the context of sustainable development of regions. 4th International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 1254, 012134. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012134*
32. *Szamalek, K., Zglinicki, K., & Mazurek, S. (2022). On the criticality of minerals otherwise. New approach taking into account cultural, social and historical factors. Gospodarka surowcami mineralnymi – mineral resources management, 38(1), 5–16. https://doi.org/10.24425/gsm.2022.140608*

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

References

1. *Analysis of the Crushed Stone Market in Ukraine (2019). [Online]. Available at: https://pro-consulting.ua/ua/issledovanie-rynka/analiz-rynka-shebnya-v-ukraine-2019-god [in Ukrainian].*
2. *Burka, V. Y. (2019). Territorial forms of concentration of building minerals – an important factor in the formation of construction and industrial complexes. Scientific Bulletin of Chernivtsi University: Collection of Scientific Works. Series: Geography, (808), 87–92 [in Ukrainian].*
3. *Vasylenko, A. P. (2023). Monitoring of the resource base of metallic, non-metallic, and solid combustible minerals. Mineral Resources of Ukraine, (2), 17–19. https://doi.org/10.31996/mru.2023.2.17-19 [in Ukrainian].*
4. *Vasylenko, A. P. (2023). Problems of replenishing the Investor's Subsoil Use Atlas with reliable information on resources of metallic and non-metallic minerals. Mineral Resources of Ukraine, (4), 3–7. https://doi.org/10.31996/mru.2024.4.3-7 [in Ukrainian].*
5. *Vasilyev, D. (2023, July 31). How the war changed the construction market. Ukrainian Truth. [Online]. Available at: https://www.epravda.com.ua/columns/2023/07/31/702741/ [in Ukrainian].*
6. *Heleta, O. (2008). Ukrainian market of crushed stone from natural stone. Precious and Decorative Stones, 3(53), 1–3 [in Ukrainian].*
7. *Geoinform of Ukraine: Official Website. [Online]. Available at: http://geoinf.kiev.ua/ [in Ukrainian].*
8. *Building Stone. Ukraine Extractive Industries Transparency Initiative (EITI) Data Portal. [Online]. Available at: https://www.eiti.gov.ua/resursi-rozvidka-ta-vidobuvannya/kaminnya-budivelne/ [in Ukrainian].*
9. *Kilinska, K., & Kostashchuk, V. (2020). Mineral Raw Material Resources of Chernivtsi Region: Current State and Prospects for Use. Chernivtsi: Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University. (184 pp.) [in Ukrainian].*
10. *Korzhnev, M. M., & Kurylo, M. M. (2007). Mineral and raw material base of Ukraine in the context of globalization. Strategic Panorama, (2), 14–21 [in Ukrainian].*
11. *Kostashchuk, V. I. (2006). Mineral raw material resources of administrative districts and peculiarities of their use in market conditions (on the example of Chernivtsi Region). Nature of Western Polissia and Adjacent Territories: Collection of Scientific Works, (3), 152–157. Lutsk: RVV Vezha [in Ukrainian].*
12. *Mykhailov, V. (2024). Highly promising objects of Ukraine's mineral raw material base. Part 2. Non-metallic minerals. Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology Series, 3(106), 47–56. https://doi.org/10.17721/1728-2713.106.06 [in Ukrainian].*
13. *Mineral Resources of Ukraine: Official Website. [Online]. Available at: http://minerals-ua.info [in Ukrainian].*
14. *Mishchenko, V. S. (2007). Economic Priorities for the Development and Exploitation of Ukraine's Mineral Raw Material Base. Kyiv: Naukova Dumka [Scientific Thought]. (360 pp.) [in Ukrainian].*
15. *Mishchenko, V. S. (2011). Program Planning for the Development of Ukraine's Mineral Raw Material Base: Methodology and Practice. Kyiv: State Institution Institute of Environmental Economics and Sustainable Development of the National Academy of Sciences of Ukraine. (156 pp.) [in Ukrainian].*
16. *List of Valid Departmental Building Norms (VBN), Sectoral Building Norms (GBN), Standards of Ukrainian Organizations (SOU) and Other Documents in the Field of Construction and Building Materials Industry as of 01.04.2025. [Online]. Available at: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=115276 [in Ukrainian].*
17. *Petruk, V. H., Havadza, S. V., Yermakov, V. M., Petruk, R. V., & Lubenska, N. V. (2024). Analysis of post-mining prospects for mining objects and decarbonization and greening of mineral raw materials in Vinnytsia region. In M. S. Malyovany (Ed.), Sustainable Development: Environmental Protection. Energy Saving. Balanced Nature Management: Collective Monograph (pp. 420–447). Kyiv: Yarochenko Ya. V. https://doi.org/10.51500/7826-56-8 [in Ukrainian].*
18. *Herenchuk, K. I. (Ed.). (1981). Nature of Khmelnytskyi Region. Lviv: Vyshcha Shkola [Higher School]. (152 pp.) [in Ukrainian].*
19. *Rudenko, L. H., Palienko, V. P., Baitala, V. D., et al. (2024). Approaches, principles, and methods of constructive-geographical research of regional nature management in connection with the development of Ukraine's mineral raw material base. Ukrainian Geographical Journal, (3), 13–17 [in Ukrainian].*

20. Rudenko, L. H., Palienko, V. P., Barshchevsky, M. E., et al. (2005). Problems of nature management in mining regions of Ukraine. Ukrainian Geographical Journal, (3), 18–23 [in Ukrainian].
21. Rudko, G. I., Ivanov, Ye. A., & Kovalchuk, I. P. (2019). Mining Industrial Geosystems of the Western Region of Ukraine: Monograph. 2. Kyiv–Chernivtsi: Bukrek. (838 pp.) [in Ukrainian].
22. Rudko, G. I., & Yakovliev, Ye. O. (2020). Post-mining of mining regions of Ukraine as a new direction of environmentally safe use of mineral raw materials. Mineral Resources of Ukraine, (3), 37–44. https://doi.org/10.31996/mru.2020.3.37-44 [in Ukrainian].
23. Syvyj, M. (2004). Mineral Resources of Podillia: Constructive-Geographical Analysis and Synthesis: Monograph. Ternopil: Pidruchnyky i Posibnyky [Textbooks and Manuals]. (654 pp.) [in Ukrainian].
24. Syvyj, M., Havryshok, B., & Demyanchuk, P. (2023). Mineral Raw Material Potential of Khmelnytskyi Region: Current State of Development, Prospects. Ternopil: Vector. (331 pp.) [in Ukrainian].
25. Technical Specifications for Rubble Stone. Association of Building Materials Producers of Ukraine: Official Website. [Online]. Available at: https://avnbmu.com.ua/tehnichni-umovy-na-kaminy-butovyj/ [in Ukrainian].
26. Khmelnytskyi Region. State of the Mineral Raw Material Base (Based on "Balance" Database as of 01.01.2022). (2022). Kyiv: State Scientific and Production Enterprise "Geoinform of Ukraine". (33 pp.) [in Ukrainian].
27. Elyoufut, T., & Alkhomaidat, F. (2021). Evaluation of the characteristics of natural building stones using ultrasonic inspection techniques. Arab Journal of Science and Engineering, 46, 11415–11424. https://doi.org/10.1007/s13369-021-05825-y
28. Myriounis, Ch., Varras, G., Tsirogiannis, I., & Pavlidis, V. (2015). Usage of stone materials in natural and human environment, case study in Epirus, Greece. Agriculture and Agricultural Science Procedia, 4, 431–439. https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.03.049
29. Schrenk, S. (2024). The Impact of Choosing Natural Stones as a Building Material on Sustainability and the Environment. Blog: From the Bedrock. [Online]. Available at: https://blog.polycor.com/the-impact-of-choosing-natural-stones-as-a-building-material-on-sustainability-and-the-environment
30. Syvyj, M., Mazbayev, O., Volik, O., Panteleeva, N., & Hanchuk, O. (2021). Methodological approaches to the study of mineral resource potential of regions. In Second International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2021), Kryvyi Rih, Ukraine, May 19–21, 2021. E3S Web of Conferences, 280, Article 11012. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128011012
31. Syvyj, M., Ivanov, Y., & Panteleeva, N. (2023). The problem of rational use of mineral resources and mining waste in the context of sustainable development of regions. In 4th International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters, Kryvyi Rih, Ukraine, May 23–26, 2023. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1254, 012134. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012134
32. Szamalek, K., Zglinicki, K., & Mazurek, S. (2022). On the criticality of minerals otherwise. New approach taking into account cultural, social and historical factors. Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management, 38(1), 5–16. https://doi.org/10.24425/gsm.2022.140608

Сировинна база щебеню та бутового каміння Хмельницької області

Мирослав Сивий [1]
д. геогр. н., професор кафедри географії та методики її навчання,
[1] Тернопільський національний педагогічний університет
імені Володимира Гнатюка, Тернопіль, Україна;
Петро Дем'янчук [1]
к. геогр. н., доцент кафедри географії та методики її навчання;
Ігор Холошин [2]
к. геол.-мінер. н., доцент, зав. кафедри географії та методики її навчання,
[2] Криворізький державний педагогічний університет, Кривий Ріг, Україна;
Наталя Пантелєєва [2]
асист. кафедри географії та методики її навчання

В статті проаналізовано сучасний стан вивченості родовищ сировини для щебеневої й бутової продукції у Хмельницькій області. Показано приуроченість родовищ до певних стратиграфічних підрозділів, з'ясовано загальні закономірності розміщення покладів різних видів будівельного каміння в межах районів, територіальних громад). Визначено ступінь розвіданості родовищ будівельного каміння та рівень їхнього промислового освоєння. Розраховано територіальну щільність та забезпеченість розвіданими запасами населення територіальних одиниць, показано динаміку видобування сировини за останні роки й подано пропозиції щодо нарощування обсягів видобування. Виявлено приуроченість основних баз будівельного каміння до північно-східних та південно-західних теренів області. При цьому в північно-східних територіальних громадах (ТГ) розвідані й експлуатуються в основному поклади магматичних і метаморфічних порід (гранітоїди), в південно-західних – осадових (вапняків). Максимально забезпечені сировиною такі ТГ як Михайлюцька, Березdівська та Полонська Ше-

петівського району (понад 1000 м^3/особу). Високі показники забезпеченості громад у Летичівській та Меджибізькій ТГ Хмельницького району (понад 2000 м^3/особу). У більшості ТГ області з розвіданими запасами будівельного каміння показники забезпеченості становлять 100-600 м^3/особу. Подібну картину демонструє щільність розподілу сировини по території області. Найвищі показники характерні для північно-східних та східних ТГ, а також крайніх південно-західних територій ТГ Кам'янець-Подільського. району В інших ТГ цей показник нижчий за 10000 м^3/км^2. Повністю позбавлені розвіданих запасів західні ТГ Шепетівського та центральні ТГ Хмельницького районів. Аналіз обсягів видобування сировини на державних та комерційних підприємствах регіону, асортименту їхньої продукції та термінів забезпеченості розвіданими запасами дозволив констатувати, про загалом задовільні обсяги видобування сировини в області, навіть порівняно з довоєнними роками, недостатню забезпеченість достовірними запасами окремих діючих кар'єрів, зосередженість видобування в декількох ТГ, а також недостатню завантаженість багатьох підприємств, порівняно з проєктними потужностями. Нарощування видобутку сировини в регіоні при потребі може бути досягнуте за рахунок введення в експлуатацію великих резервних родовищ (Устівське, Конотопське та ін.), розміщених на неугіддях, а також при виведені на проєктні потужності низки родовищ у Шепетівському та Хмельницькому районах.

***Ключові слова**: Хмельницька область, будівельне каміння, родовища, магматичні породи, осадові породи, сировина, територіальні громади, територіальна щільність, забезпеченість, видобування.*

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу
Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 9 липня 2025 р.
Прийнята 23 жовтня 2025 р.

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-30
УДК 631.452:004.94:528.85(477.46)
Надійшла 12 липня 2025 р.
Прийнята 7 листопада 2025 р.

Комплексне прогнозування геопросторових змін родючості ґрунтів Черкаської області з використанням моделей CLUE-S та ANN

Надія Сопова [1]
ст. викладач кафедри управління земельними ресурсами, геодезії та кадастру,
[1] Державний біотехнологічний університет, Харків, Україна,
e-mail: lnau.sopova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-0597-5598;
Роман Олепір [2]
к. с.-г. н., доцент кафедри землеробства і агрохімії імені В. І. Сазанова,
[2] Полтавський державний аграрний університет, Полтава, Україна,
e-mail: roman.olepir@pdau.edu.ua, https://orcid.org/0000-0002-0825-7914;
Дмитро Сопов [3]
д. філософії (науки про Землю), доцент кафедри геодезії, землеустрою та земельного кадастру,
[3] Одеський державний аграрний університет, Одеса, Україна,
e-mail: odau.sopov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-2684-4688;
Ірина Кирпичова [4]
к. біол. н., доцент кафедри садово-паркового господарства та екології,
[4] ДЗ «Луганський національний університет імені Тараса Шевченка», Полтава, Україна,
e-mail: kirinopsis@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-4633-9379;
Катерина Березенко [4]
ст. викладач кафедри садово-паркового господарства та екології,
e-mail: berezenko.e.s@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3975-5278;
Ірина Чередниченко [4]
к. с.-г. н., доцент кафедри хімії, географії та наук про Землю,
e-mail: soil911@ukr.net, https://orcid.org/0009-0005-6325-4870;
Наталія Маслова [5]
к. геогр. н., доцент кафедри природничих наук і методик їхнього навчання,
[5] Центральноукраїнський державний університет імені Володимира Винниченка, Кропивницький, Україна,
e-mail: maslnatnic@ukr.net, https://orcid.org/0000-0002-2637-9755;
Ірина Бузіна [1]
к. с.-г. н., доцент кафедри екології та біотехнологій в рослинництві,
e-mail: nezabudka120187@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-0885-0558;
Людмила Макєєва [1]
к. н. з держ. упр., доцент кафедри управління земельними ресурсами, геодезії та кадастру,
e-mail: makeevafiz2017@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-9121-8560;
Аліна Бубнікович [6]
ст. викладач кафедри агрономії та землеустрою,
[6] Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, Київ, Україна,
e-mail: ab8190805@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-6553-321X

Об'єктом дослідження є зміни родючості ґрунтів Черкаської області під впливом природних, соціально-економічних та антропогенних факторів. Проблема, що вирішувалася, полягає у необхідності створення науково обґрунтованої моделі прогнозування змін родючості ґрунтів, яка враховує просторову динаміку землекористування та взаємозв'язки між агрохімічними параметрами, типами використання земель та економічними факторами. В ході дослідження розроблено інтегровану модель прогнозування змін родючості основних типів ґрунтів регіону, що поєднує просторово-динамічну модель CLUE-S для аналізу змін землекористування та штучну нейронну мережу (ANN) для прогнозування агрохімічних показників. Встановлено, що рівень гумусу та pH є ключовими факторами, що визначають довготривалу продуктивність ґрунтів. Згідно з результатами моделювання, у разі збереження поточних тенденцій землекористування (BAU-сценарій) рівень гумусу може знизитися на 8–12 % до 2050 року, а pH – до 5,7, що призведе до зниження родючості на 15–20 %. У сценарії сталого управління (SLU) завдяки оптимізації сівозмін та заходам із підтримання високого вмісту органіки можливе збереження гумусу на рівні 4 % та стабілізація pH у межах 6,3–6,5, що покращує ефективність використання поживних речовин. Відмінною рисою отриманих результатів є комплексне врахування соціально-економічних факторів, таких як політика державних дотацій, рівень фінансування аграрного сектору та ринкова кон'юнктура, що дозволяє формувати реалістичні сценарії прогнозування

© Сопова Надія, Олепір Роман, Сопов Дмитро, Кирпичова Ірина, Березенко Катерина, Чередниченко Ірина, Маслова Наталія, Бузіна Ірина, Макєєва Людмила, Бубнікович Аліна, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

змін ґрунтових ресурсів. Сфера практичного використання отриманих результатів охоплює планування агроландшафтів, розробку стратегій сталого землекористування та формування політики управління земельними ресурсами. Застосування інтегрованої моделі CLUE-S + ANN дозволить оцінювати довгострокові наслідки зміни землекористування, оптимізувати використання ґрунтових ресурсів та запобігати їх деградації в умовах змін клімату та соціально-економічних трансформацій.

***Ключові слова**: землекористування, ґрунт, родючість ґрунтів, прогнозування, просторове моделювання, CLUE-S, ANN, деградація ґрунтів, агрохімічні показники.*

Як цитувати: Сопова Надія, Олепір Роман, Сопов Дмитро, Кирпичова Ірина, Березенко Катерина, Чередниченко Ірина, Маслова Наталія, Бузіна Ірина, Макєєва Людмила, Бубнікович Аліна (2025). Комплексне прогнозування геопросторових змін родючості ґрунтів Черкаської області з використанням моделей CLUE-S та ANN. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*, (63), 411-425. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-30

In cites: Sopova Nadiia, Olepir Roman, Sopov Dmytro, Kyrpychova Iryna, Berezenko Kateryna, Cherednychenko Iryna, Maslova Nataliia, Buzina Iryna, Makieieva Liudmyla, Bubnikovych Alina (2025). Comprehensive forecasting of geospatial changes in soil fertility in Cherkasy region using CLUE-S and ANN models. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 411-425. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-30 [in Ukrainian]

Вступ. Вивчення родючості ґрунтів потребує врахування просторово-часових змін землекористування, які формуються під впливом економічних, соціальних і природних факторів. Для прогнозування таких змін широко застосовується модель CLUE-S, що дозволяє оцінювати сценарії розвитку територій. Однак агрохімічні властивості ґрунтів змінюються також під дією процесів мінералізації гумусу, акумуляції поживних речовин і хімічної деградації, тому для їх аналізу використовують штучні нейронні мережі (ANN), здатні моделювати складні багатофакторні взаємозв'язки.

Попри ефективність CLUE-S та ANN окремо, комплексних рішень, що поєднують прогнозування змін землекористування з оцінкою їх впливу на родючість ґрунтів, майже немає. Такий інтегрований підхід дозволив би враховувати й соціально-економічні фактори, підвищуючи точність моніторингу та управління земельними ресурсами. Поєднання CLUE-S і ANN дає змогу не лише прогнозувати зміни родючості, а й своєчасно виявляти ризики деградації, що є ключовим для збереження продуктивності агроландшафтів і сталого розвитку сільського господарства.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. У роботі [1] показано, що модель CLUE-S ефективна для прогнозування змін посівних площ до 2050 року, проте не враховує соціально-економічні фактори, що обмежує її точність. Рішенням може бути інтеграція додаткових моделей, які враховують економічні аспекти землекористування.

У роботі [2] показано, що інтеграція моделей BP–ANN і CLUE-S підвищує точність прогнозів землекористування. Проте дослідження стосується лише одного регіону Китаю, що обмежує його застосування в інших умовах. Це підкреслює потребу у більш універсальній методиці, здатній враховувати регіональні відмінності.

У дослідженні [3] запропоновано модель змін землекористування з урахуванням просторової автокореляції, яка підвищує точність прогнозів завдяки поєднанню просторових залежностей і нейронних мереж. Проте вона потребує значних обчислювальних ресурсів і детальних геоданих, а деякі типи землекористування моделюються менш точно, що потребує подальшої оптимізації.

У роботі [4] проведено багатосценарне моделювання змін землекористування за допомогою CLUE-S та PLUS. Показано, що PLUS точніше моделює лісові та водні об'єкти, хоча для інших типів землекористування різниця невелика, що вказує на обмеження моделей через нестачу вхідних даних або алгоритмічні обмеження.

У роботі [5] показано, що модель DynaCLUE ефективно враховує просторові та екологічні фактори для прогнозування змін землекористування в Південній Італії та оцінки різних сценаріїв управління. Однак соціально-економічні фактори не враховані, що обмежує точність прогнозів через брак даних або складність їх інтеграції.

У дослідженні [6] запропоновано інтеграцію просторових асоціацій у моделі землекористування для підвищення точності прогнозів. Проте залишаються проблеми адаптації підходу до різних регіонів і масштабів, а також врахування соціально-економічних факторів.

У дослідженні [7] модель DynaCLUE використано для прогнозування змін землекористування в басейні річки Муннеру, Індія, за шістьма сценаріями до 2080 року, показавши значне розширення забудови. Проте соціально-економічні фактори в моделюванні залишилися неврахованими.

У статті [8] застосовано машинне навчання для оцінки якості ґрунтів у напіввологих умовах Чорноморського регіону. Штучні нейронні мережі ефективно прогнозують індекс якості, але їх адаптація до інших регіонів поки не вирішена.

У дослідженні [9] метод BP-ANN використано для оцінки родючості ґрунтів на тютюнових плантаціях південно-західного Китаю. Модель ефективно прогнозує інтегральний індекс родючості, проте обмеженість регіону та культури знижує універсальність результатів.

У статті [10] застосовано ГІС та нейронні

мережі для моделювання просторової гетерогенності та прогнозування змін агрохімічних властивостей степових ґрунтів Херсонської області. Дослідження підкреслює ефективність нейронних мереж для просторово-часового прогнозування, водночас вказуючи на потребу врахування регіональних особливостей і специфіки культур.

Аналіз літератури показує, що попри успішне використання CLUE-S та нейронних мереж для моделювання землекористування, залишаються проблеми адаптації моделей до конкретних регіонів і культур через брак даних, складність інтеграції факторів та технічні обмеження. Недостатньо вивчено вплив змін землекористування на родючість ґрунтів і поєднання CLUE-S з ANN для комплексного прогнозування. Адаптивні моделі з урахуванням регіональних особливостей і місцевих агротехнічних практик, зокрема для Черкаської області, дозволять точніше прогнозувати стан ґрунтів і ефективніше управляти земельними ресурсами для сталого використання та продовольчої безпеки.

Мета та завдання дослідження. Мета дослідження – розробка інтегрованої моделі для прогнозування змін родючості ґрунтів Черкаської області, яка поєднує можливості моделей CLUE-S та штучних нейронних мереж, забезпечуючи високу точність та адаптивність прогнозів.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

- дослідити вплив показників ґрунту, що впливають на прогнозування змін родючості ґрунтів;

- розробити інтегровану модель прогнозування змін родючості ґрунтів Черкаської області, яка поєднує моделі CLUE-S та ANN.

Матеріали та методи досліджень. Об’єктом дослідження є найбільш поширені типи ґрунтів Черкаської області, зокрема їхні фізико-хімічні характеристики, такі як pH, вміст гумусу, азоту, фосфору та калію, що визначають родючість та продуктивність земель.

Основна гіпотеза дослідження полягає в тому, що різні типи змін землекористування, такі як інтенсивне землеробство, розширення урбанізованих територій та зміна структури посівів, безпосередньо впливають на родючість ґрунтів, і їх можна ефективно прогнозувати за допомогою інтеграції моделей CLUE-S та ANN.

У дослідженні прийнято кілька припущень. По-перше, вплив землекористування, клімату та агротехнічних заходів детермінований і може бути описаний математично. По-друге, наявні дані забезпечують можливість виконання узагальненого моделювання основних типів ґрунтів Черкаської області. По-третє, інформація з Єдиного державного веб-порталу відкритих даних характеризується достатнім рівнем точності для проведення такого моделювання. При цьому застосовано спрощення: короткостроковий (до 10 років) вплив кліматичних змін вважається несуттєвим, вплив людської діяльності враховується лише через зміни землекористування, а деградація ґрунтів описується змінами основних агрохімічних показників.

Для просторового моделювання використовується програмне забезпечення CLUE-S [11], яке є одним із найпоширеніших інструментів для моделювання змін землекористування. Його особливістю є здатність враховувати просторово-часові закономірності змін землекористування та їхній вплив на природні та антропогенні фактори, а для побудови нейронної мережі застосовується MatLab з відповідними бібліотеками машинного навчання [12].

Для прогнозування змін родючості ґрунтів Черкаської області була розроблена інтегрована модель, яка поєднує можливості CLUE-S (Conversion of Land Use and its Effects at Small regional extent) для просторового моделювання змін землекористування та штучної нейронної мережі (ANN) для прогнозування агрохімічних параметрів ґрунтів.

Об'єднання цих моделей дозволяє отримати комплексний підхід:

- CLUE-S аналізує майбутні сценарії змін землекористування, враховуючи природні та соціально-економічні фактори, що впливають на ґрунтовий покрив;

- ANN використовує результати моделювання CLUE-S як вхідні дані для прогнозування змін агрохімічних показників ґрунтів (pH, гумус, макроелементи).

Інтегрована модель складається з кількох послідовних етапів:

1. Вхідні дані та їх підготовка. Основні категорії вхідних даних [13, 14, 15, 16, 17]:

- просторові дані: карти землекористування Черкаської області (2000, 2010, 2020 роки);

- ґрунтові показники: дані щодо вмісту гумусу, азоту, фосфору, калію та рівня pH;

- кліматичні показники: середньорічна температура та рівень зволоження;

- соціально-економічні дані: площа сільськогосподарських угідь, інтенсивність землеробства.

2. Моделювання змін землекористування за допомогою CLUE-S. CLUE-S був використаний для моделювання майбутніх сценаріїв змін землекористування на період до 2050 року. Для цього враховувалися:

- зміни у використанні ріллі, пасовищ і лісових земель;

- сценарії урбанізації та розширення сільськогосподарських угідь;

- кліматичні зміни, що можуть впливати на деградацію ґрунтів.

Результати моделювання CLUE-S дозволили визначити, які території області будуть зазнавати змін і наскільки ці зміни можуть впливати на хімічний склад ґрунтів.

3. Прогноз агрохімічних показників за допомогою ANN. Результати CLUE-S були використані як вхідні змінні для ANN, яка прогнозувала зміни родючості ґрунтів на основі просторових характеристик та історичних даних. Структура нейронної мережі:

- вхідний шар (6 нейронів): pH, вміст гумусу, азоту, фосфору, калію, клас землекористування (змодельований CLUE-S);
- приховані шари: три шари (5, 4, 3 нейрони), функція активації – сигмоїдна;
- вихідний шар (1 нейрон): прогнозований рівень родючості ґрунту (%);
- функція навчання: алгоритм зворотного поширення помилки (backpropagation);
- розподіл даних: 80 % для навчання, 10 % для валідації, 10 % для тестування.

Перевірка адекватності моделі проводиться шляхом порівняння прогнозованих та фактичних значень родючості ґрунтів. Валідацію отриманих прогнозів, а також оцінку точності моделі виконано за допомогою метрик середньоквадратичної помилки (MSE) та коефіцієнта детермінації (R^2).

Результати дослідження розробки інтегрованої моделі для прогнозування змін родючості ґрунтів.

Вплив показників ґрунту, що впливають на прогнозування змін родючості ґрунтів. Для оцінки впливу ключових факторів на родючість ґрунтів Черкаської області проведено дисперсійний аналіз (ANOVA). Основними параметрами, що підлягали аналізу, були: вміст гумусу, pH ґрунту, вміст азоту, фосфору та калію, тип ґрунту, середньорічна температура, рівень зволоження та структура землекористування. Ці фактори відіграють ключову роль у забезпеченні продуктивності ґрунтів, оскільки впливають на доступність поживних речовин, водний баланс та мікробіологічну активність у ґрунті.

Результати дисперсійного аналізу [18] показали, що основними факторами, що визначають родючість ґрунтів, є вміст гумусу та рівень pH, що підтверджується оцінкою ANOVA ($p < 0,01$). Вміст гумусу в межах 3,5–5,5 % сприяє високій продуктивності ґрунту, тоді як зниження його рівня нижче 3 % призводить до втрати родючості на 20–30 %. Це пояснюється тим, що гумус виконує низку важливих функцій, серед яких покращення водоутримувальної здатності ґрунту, сприяння розвитку ґрунтової мікрофлори та оптимізація аераційних властивостей.

Реакція ґрунтового розчину (pH) є критичним фактором, що визначає доступність поживних речовин. Найвища ефективність засвоєння макроелементів спостерігається в межах pH 6,2–6,8. При підвищенні кислотності (pH < 5,5) фосфор переходить у нерозчинні форми ($FePO_4$, $AlPO_4$), що обмежує його доступність для рослин, а також підвищується концентрація токсичних елементів, таких як алюміній, що негативно впливає на кореневу систему. Окрім цього, спостерігається зниження активності мікроорганізмів, які відповідають за мінералізацію органічної речовини. Надмірно лужний ґрунт (pH > 7,5), навпаки, викликає дефіцит мікроелементів, таких як залізо та марганець, що також негативно позначається на розвитку рослин.

Вміст макроелементів, зокрема валових форм азоту, фосфору та калію, суттєво впливає на продуктивність ґрунту. Азот є основним елементом живлення, дефіцит якого (< 0,15 %) призводить до пожовтіння листя, зниження фотосинтетичної активності та слабкого розвитку кореневої системи, тоді як концентрація понад 0,25 % сприяє формуванню вегетативної маси. Фосфор відіграє ключову роль у розвитку кореневої системи та енергетичних процесах у рослинах, і його концентрація понад 0,25 % покращує вуглеводний обмін та підвищує стійкість до хвороб. Калій відповідає за регуляцію водного балансу та стійкість до стресових умов, таких як посуха та заморозки. Недостатній рівень калію (< 0,12 %) підвищує чутливість рослин до патогенних факторів.

Вологість ґрунту є ще одним ключовим фактором родючості. Оптимальний рівень вологості в межах 50–70 % забезпечує активне функціонування кореневої системи та розвиток мікроорганізмів. Зниження вологості нижче 30 % призводить до формування сухих зон навколо коренів, пригнічення мікробної активності та зменшення врожайності на 20–25 %. Температурний режим також впливає на процеси ґрунтоутворення: середньорічна температура повітря понад 12 °C прискорює мінералізацію органічної речовини, що в довгостроковій перспективі може зменшити вміст гумусу.

Тип ґрунту є визначальним чинником його продуктивності. Чорноземи характеризуються високим вмістом гумусу, розвиненою структурою та здатністю утримувати вологу, що забезпечує високу врожайність, яка перевищує врожайність супіщаних ґрунтів на 20–30 %. Супіщані ґрунти, навпаки, мають високу проникність і швидко втрачають вологу, що обмежує їхню придатність для вирощування культур без додаткового зрошення. Глинисті ґрунти відзначаються низькою проникністю, що може створювати проблеми з дренажем і водним балансом [19].

Вплив основних параметрів на родючість ґрунтів представлено на рисунку 1.

Для перевірки взаємозв'язків між основними факторами родючості було проведено кореляційний аналіз. Отримані результати показують сильну кореляцію між вмістом гумусу та родючістю ґрунтів (R = 0,85), що підтверджує важливість гумусу у підтримці довготривалої продуктивності земель. Вміст азоту та pH також виявилися значущими (R = 0,72 та R = 0,78 відповідно). Водночас рівень калію мав порівняно слабший вплив (R = 0,50), що може свідчити про необхідність додаткового врахування його мобільності у ґрунті та взаємодії з іншими макроелементами.

Таким чином, результати дисперсійного аналізу підтвердили значущість основних факторів, що впливають на родючість ґрунтів. Оптимальне поєднання гумусу, pH та вологості забезпечує максимальну продуктивність, що є ключовим для підвищення врожайності сільськогосподарських культур.

Взаємозв'язок між факторами родючості

Параметр	*Оптимальні умови*	*Родючість (%)*	*При несприятливих умовах (%)*	*P-значення (ANOVA)*
Вміст гумусу (%)	3,5–5,5	90–95 < 3 %	70	< 0,01
pH ґрунту	6,2–6,8	90	< 5,5 або > 7,5: 65	< 0,01
Вміст азоту (%)	> 0,25	85	< 0,15: 60	< 0,05
Вміст фосфору (%)	> 0,25	88	< 0,15: 68	< 0,05
Вологість ґрунту (%)	50–70	92	< 30: 70	< 0,05
Температура (°C)	10–12	90	> 15: 75	< 0,05
Тип ґрунту	Чорнозем: 95; Супіщаний: 80	-	-	< 0,05

Рис. 1. Вплив агрохімічних параметрів на родючість ґрунтів /
Fig. 1. The influence of agrochemical parameters on soil fertility

ґрунтів є багатокомпонентним, що підтверджується регресійним аналізом. Наприклад, pH ґрунту безпосередньо впливає на доступність азоту, фосфору та калію. При низькому pH (нижче 5,5) спостерігається значна фіксація фосфору у нерозчинні сполуки, що робить його недоступним для рослин. При pH вище 7,5 погіршується засвоєння мікроелементів, таких як залізо та марганець, що також впливає на метаболічні процеси в рослинах.

Тип ґрунту визначає водний баланс і рухомість поживних речовин. Наприклад, у чорноземах завдяки високому вмісту гумусу забезпечується рівномірний розподіл вологи та поживних речовин, тоді як у піщаних ґрунтах вода швидко вимиває нітрати, що знижує ефективність азотного живлення рослин. Висока вологість (понад 70 %) у важких глинистих ґрунтах може спричинити дефіцит кисню, що обмежує діяльність кореневої системи і мікроорганізмів, відповідальних за мінералізацію органічної речовини.

З метою оцінки найбільш впливових факторів, що визначають родючість ґрунтів, був проведений множинний регресійний аналіз. В якості незалежних змінних було використано pH ґрунту, вміст гумусу, азоту, фосфору, калію та рівень вологості, а залежною змінною виступала прогнозована продуктивність ґрунту (у відсотках).

Модель регресійного аналізу має наступний вигляд:

$$Y = 5,2 + 1,8X_1 + 2,1X_2 + 0,9X_3 + 0,7X_4 + 0,5X_5 - 1,3X_6 \quad (1)$$

де Y – прогнозована родючість ґрунту; X_1 – вміст гумусу (%); X_2 – pH ґрунту; X_3 – вміст азоту (%); X_4 – вміст фосфору (%); X_5 – вміст калію (%); X_6 – відхилення вологості від оптимального рівня (50–70 %).

Розглянемо модель регресійного аналізу з точки зору впливу факторів:

- Константа (5,2) – означає базовий рівень родючості при нульових значеннях усіх факторів (що в реальних умовах є лише теоретичним припущенням);

- X_1 (1,8) – кожне збільшення вмісту гумусу на 1 % підвищує прогнозовану родючість на 1,8 %. Гумус є одним із найважливіших факторів, що визначають здатність ґрунту утримувати вологу, засвоювати поживні речовини та підтримувати мікрофлору;

- X_2 (2,1) – рівень pH має ще більший вплив: зміна на одну одиницю pH спричиняє зміну родючості на 2,1 %. Це пояснюється тим, що pH впливає на доступність поживних елементів, мікробіологічну активність і загальний стан ґрунтового середовища;

- X_3 (0,9) – вміст азоту є ключовим елементом живлення рослин, а кожне його підвищення на 0,1 % підвищує родючість на 0,9 %. Дефіцит азоту може призводити до зменшення врожайності на 20–30 %;

- X_4 (0,7) – кожне збільшення вмісту фосфору на 0,1 % підвищує родючість на 0,7 %. Фосфор є важливим для розвитку кореневої системи та загальної енергетичної забезпеченості рослин;

- X_5 (0,5) – вплив калію є менш значним, але все ще важливим. Збільшення його концентрації на 0,1 % сприяє підвищенню родючості на 0,5 %. Калій відповідає за регуляцію водного обміну рослин та їхню стійкість до стресових факторів;

- X_6 (-1,3) – відхилення вологості від оптимального рівня має негативний вплив. Наприклад, якщо вологість падає нижче 50 % або перевищує 70 %, родючість зменшується на 1,3 % за кожен відсоток відхилення. Це пояснюється тим, що занадто сухі ґрунти обмежують доступність поживних речовин, а надмірне зволоження може спричинити анаеробні умови, негативно впливаючи на розвиток кореневої системи.

Коефіцієнти моделі показують, що найбільший внесок у родючість мають вміст гумусу (β = 1,8) та pH ґрунту (β = 2,1), що підтверджує важливість підтримки цих параметрів на оптимальному рівні. Це свідчить про те, що ці показники є ключовими у прогнозуванні змін родючості.

Аналіз впливу основних агрохімічних показників ґрунту на прогнозовану родючість було додатково ще проведено за допомогою теплової карти, яка відображає просторово-динамічні закономірності взаємозв'язку між рівнем pH, вмістом гумусу та продуктивністю ґрунтів.

Для оцінки геопросторового розподілу прогнозованої родючості ґрунтів Черкаської області було побудовано теплову карту (imagesc) та контурну карту (contourf), які відображають взаємозв'язок між агрохімічними факторами та продуктивністю ґрунтів (рис. 2).

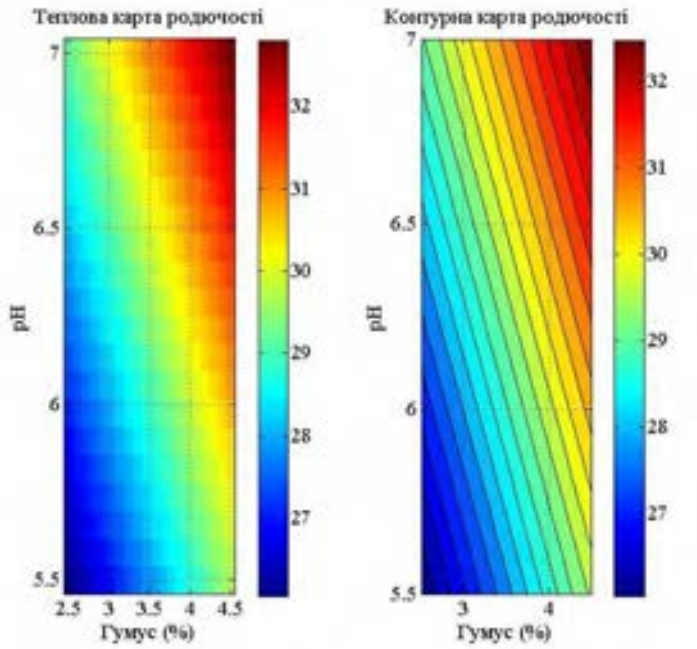


Рис. 2. Теплова та контурна карти впливу агрохімічних параметрів (рівня pH, вмісту гумусу) на прогнозовану родючість ґрунтів Черкаської області / Fig. 2. Heat and contour maps of the influence of agrochemical parameters (pH level, humus content) on the predicted fertility of soils in Cherkasy region

Карти демонструють розподіл родючості залежно від основних агрохімічних параметрів, включаючи вміст гумусу, рівень pH. Червоні та жовті ділянки карт відповідають зонам з високою родючістю, що характеризуються оптимальним рівнем основних показників, тоді як сині та темно-зелені області вказують на зони деградації ґрунтів, де відбувається зниження вмісту гумусу або відхилення кислотності від оптимальних меж.

Одним із ключових показників, використаних при створенні карт просторового розподілу родючості, є вміст гумусу, адже він визначає основні агрохімічні та фізичні властивості ґрунту. Гумус забезпечує структурну стійкість, покращує водоутримання та аерацію, слугує джерелом макро- й мікроелементів, необхідних для живлення рослин. Високий його рівень підвищує стійкість ґрунту до ерозії, знижує ризики деградації та сприяє збереженню продуктивності агроекосистем [20].

Результати моделювання показують, що оптимальний рівень pH (6,2–6,8) та вміст гумусу (4,0–5,0 %) забезпечують максимальні значення прогнозованої родючості ґрунту. Ці зони представлені жовтими та червоними відтінками на тепловій карті, що вказує на високий потенціал продуктивності.

Натомість, зниження рівня гумусу менше 3%

та pH нижче 5,5 супроводжується різким падінням прогнозованої родючості на 15–20 % (темно-сині зони на карті). Це пов'язано з посиленням процесів деградації ґрунту, погіршенням його структури та зменшенням доступності елементів живлення для рослин.

Оцінка взаємозв'язку між рівнем pH та гумусу також дозволяє встановити критичні порогові значення. Наприклад, у випадку підкислення ґрунту (pH < 5,5) спостерігається зменшення доступності фосфору, що знижує ефективність мінерального живлення. Водночас, лучні ґрунти (pH > 7,5) демонструють зменшення засвоєння мікроелементів, таких як залізо та марганець, що також негативно впливає на продуктивність агросистем.

Таким чином, результати теплового аналізу підтверджують, що найбільш сприятливі умови для підтримки стабільної родючості формуються у ґрунтах із нейтральним або слабокислим pH (6,2–6,8) та достатнім вмістом гумусу (4,0–5,0 %). Порушення цих умов призводить до падіння прогнозованої продуктивності на 10–25 %, що підтверджує необхідність впровадження заходів зі збереження органічної речовини в ґрунті та контролю рівня кислотності.

Для визначення нелінійних взаємозв'язків була застосована штучна нейронна мережа (ANN). Вибір цього підходу пояснюється тим, що традиційні регресійні моделі добре описують лінійні залежності, проте вони не враховують складних багатофакторних взаємодій між параметрами ґрунту. ANN дозволяє побудувати адаптивну модель, яка здатна виявляти приховані залежності між вхідними даними та вихідним показником родючості.

Мережа була реалізована у вигляді багатошарового персептрона (MLP) з трьома прихованими шарами. Кількість нейронів у прихованих шарах була підібрана емпірично на основі критерію мінімізації середньоквадратичної похибки (MSE). Функція активації для прихованих шарів – sigmoid, а для вихідного шару – linear.

Дані були поділені на навчальну (80 %) та тестову (20 %) вибірки, що забезпечило коректне навчання моделі без ефекту перенавчання. В якості функції оптимізації використовувався алгоритм backpropagation із швидкістю навчання 0,01. Навчання тривало до досягнення порогу похибки 10^{-4}, що гарантувало стабільність прогнозів.

Отримані результати моделювання відображено на рисунку 3.

Для оцінки узагальнюваності ANN була проведена додаткова перевірка на незалежному наборі даних, що включав зразки ґрунту. Результати показали, що середньоквадратична похибка (MSE) залишалася стабільною на рівні 0,0025, а середнє відхилення прогнозованих значень не перевищувало 5 %, що підтверджує надійність моделі. Це свідчить про те, що нейронна мережа може бути використана для прогнозування змін родючості ґрунтів у різних умовах регіону.

Модель ANN продемонструвала високу точність прогнозування, що підтверджується низькими відхиленнями фактичних та прогнозованих значень (у межах 0,3–4,0 %). Візуалізація результатів моделі прогнозування родючості ґрунту представлена на рисунку 4.

Отримані результати моделювання вказують на те, що оптимальний рівень pH для підтримки високої родючості становить 6,5. Зниження цьо-

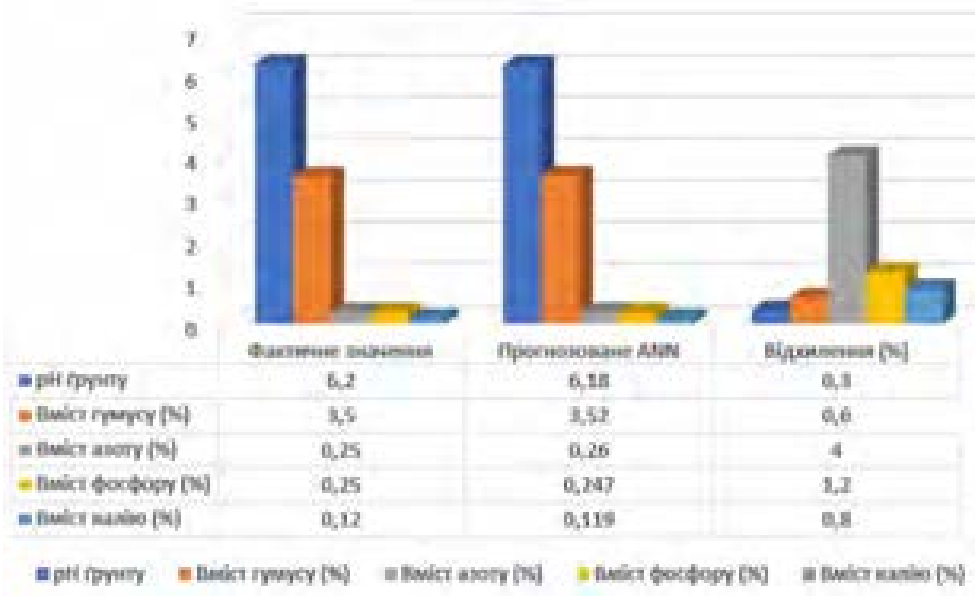


Рис. 3. Прогнозовані та фактичні значення агрохімічних показників /
Fig. 3. Predicted and actual values of agrochemical indicators

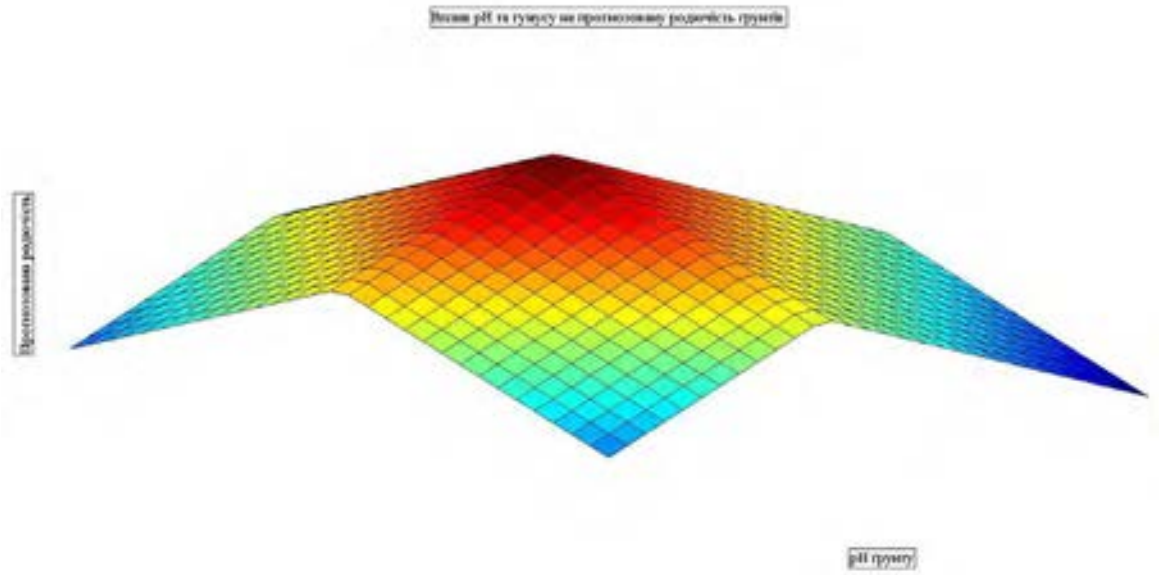


Рис. 4. Моделювання прогнозованої родючість ґрунтів / Fig. 4. Modeling predicted soil fertility

го показника до 5,5 або збільшення до 7,5 призводить до зменшення прогнозованої продуктивності на 12–18 %. Також встановлено, що рівень гумусу відіграє критичну роль у формуванні родючості, і його зменшення з 6 % до 2 % спричиняє падіння прогнозованої продуктивності ґрунтів на 25 %.

Розробка інтегрованої моделі прогнозування змін родючості ґрунтів Черкаської області, яка поєднує моделі CLUE-S та ANN. Для оцінки просторово-часових змін родючості ґрунтів Черкаської області створено інтегровану модель на основі CLUE-S та штучної нейронної мережі (ANN). CLUE-S прогнозує трансформації землекористування з урахуванням природних і соціально-економічних факторів, тоді як ANN оцінює вплив цих змін на агрохімічні показники, зокрема гумус, pH та вміст макроелементів.

Модель CLUE-S використовує карти землекористування 2000, 2010 і 2020 років, середньорічну температуру, рівень зволоження, площу сільгоспугідь, інтенсивність землеробства та сценарії урбанізації. Прогноз до 2050 року показує розширення сільськогосподарських земель на 7,5 % у центральних та південних районах та можливе скорочення орних земель на півночі через зростання площ населених пунктів і промислових об'єктів. Урбанізація найбільше вплине поблизу обласного центру, зменшуючи сільгоспугіддя на 3–5 %.

Виділено два сценарії розвитку. У BAU (Business as usual) продовження поточних тенденцій призводить до виснаження гумусу до 2,5 %, зниження pH до 5,7 і фіксації фосфору, що зменшує родючість на 15–20 %. У SLU (Sustainable land use) оптимізація сівозмін та застосування органічних добрив підвищує гумус до 3,8–4,2 % і підтримує pH на рівні 6,3–6,5, що забезпечує підвищення родючості на 10–12 %. Сценарії формувалися на основі історичних даних землекористування, демографічних прогнозів та державної аграрної політики. У SLU враховано екологічні заходи: обмеження розорювання ґрунтів, розвиток органічного землеробства та фінансову підтримку фермерів.

Аналіз економічних показників виявив, що доходи агровиробників, державні дотації та ринкова ситуація впливають на темпи трансформації земель. Економічна підтримка сприяє розширенню ріллі, інтенсивнішому використанню добрив і скороченню відновлення ґрунтів, що призводить до зменшення гумусу, змін кислотності та дисбалансу поживних речовин [21].

За сценарієм інтенсивного землеробства (BAU) розширення орних земель відбувається за рахунок скорочення природних екосистем, що знижує гумус на 8–12 %, у найактивніших регіонах до 2,5 %. Це зменшує водоутримувальну здатність ґрунту, підвищує ерозійні ризики та знижує доступність фосфору й інших макроелементів через падіння pH до 5,7. Крім того, рівень азоту та фосфору зменшується на 6–9 %, що може знизити врожайність на 12–15 %.

У сценарії сталого управління (SLU) оптимізація сівозмін, скорочення площ орних земель та застосування екологічних агротехнологій стабілізують гумус на рівні 4 %, а pH підвищується до 6,3–6,5, що покращує засвоєння поживних елементів і підвищує продуктивність ґрунтів на 10–12 %. Інтеграція соціально-економічних факторів у ANN підвищує точність прогнозів: коефіцієнт детермінації R^2 досягає 0,92, що на 14 % перевищує результати моделей без економічних параметрів.

Вхідні параметри ANN включали такі ключові змінні – рисунок 5.



Рис. 5. Ключові змінні вхідних параметрів ANN / Fig. 5. Key variables of ANN input parameters

Детальний аналіз впливу окремих вхідних параметрів ANN показав, що серед соціально-економічних факторів найбільший вплив на прогнозовані агрохімічні показники мають рівень державної підтримки аграрного сектору (β = 0,78), динаміка ринкових цін на зернові культури (β = 0,65) та темпи урбанізації (β = 0,52). Це підтверджує, що політичні рішення та економічні чинники безпосередньо визначають стратегії землекористування та, відповідно, зміни родючості ґрунтів. Водночас такі параметри, як темпи застосування добрив та інтенсивність використання сільськогосподарських угідь, демонструють нелінійний вплив, що вказує на можливість оптимізації агротехнологічних практик для запобігання деградації ґрунтів.

Економічні стимули, державна підтримка екологічного землеробства та фінансові інвестиції в ґрунтозахисні заходи впливають на агрохімічні властивості ґрунтів. Регіони з більшими вкладеннями у стале землеробство характеризуються повільнішою деградацією ґрунтів, тоді як інтенсивне землеробство без екологічних обмежень прискорює виснаження гумусу та зниження родючості [22, 23].

Результати моделювання CLUE-S були використані як вхідні змінні для ANN, яка прогнозувала зміни родючості ґрунтів на основі просторових характеристик та історичних даних.

Структура нейронної мережі складається з вхідного шару (6 нейронів): pH, вміст гумусу, азоту, фосфору, калію, клас землекористування (змодельований CLUE-S). Прихованих шарів: три шари (5, 4, 3 нейрони), функція активації – сигмоїдна. Вихідного шару (1 нейрон): прогнозований рівень родючості ґрунту (%).

У якості функції навчання виступає алгоритм зворотного поширення помилки (backpropagation).

Розподіл даних складається з 80 % для навчання, 10 % для валідації, 10 % для тестування.

Для узгодження результатів моделі CLUE-S та ANN було проведено просторове накладання прогнозованих змін землекористування на регіональні точки спостереження агрохімічних показників. Кожен полігон у CLUE-S був співвіднесений із середніми значеннями ґрунтових показників ANN, що дозволило інтегрувати просторовий підхід з детальним аналізом змін родючості.

На основі розрахунків було створено карти змін родючості, що представлені на рисунку 6 (а, б, в).

Згідно BAU-сценарію найбільше зниження продуктивності ґрунтів прогнозується у центральних та західних районах Черкаської області, де відбувається активна експлуатація земель. Зниження рівня гумусу (на 8–12 %) та pH (до 5,7) у BAU-сценарії пов’язане зі збільшенням площ орних земель на 7,5 %, що супроводжується скороченням природних екосистем, інтенсивним застосуванням мінеральних добрив та скороченням періоду природного відновлення ґрунтів.

Відповідно до SLU-сценарію прогнозоване підвищення рівня гумусу становить 3,8–4,2 %, а pH стабілізується у межах 6,3–6,5. Це сприяє зростанню продуктивності ґрунтів на 10–12 %.

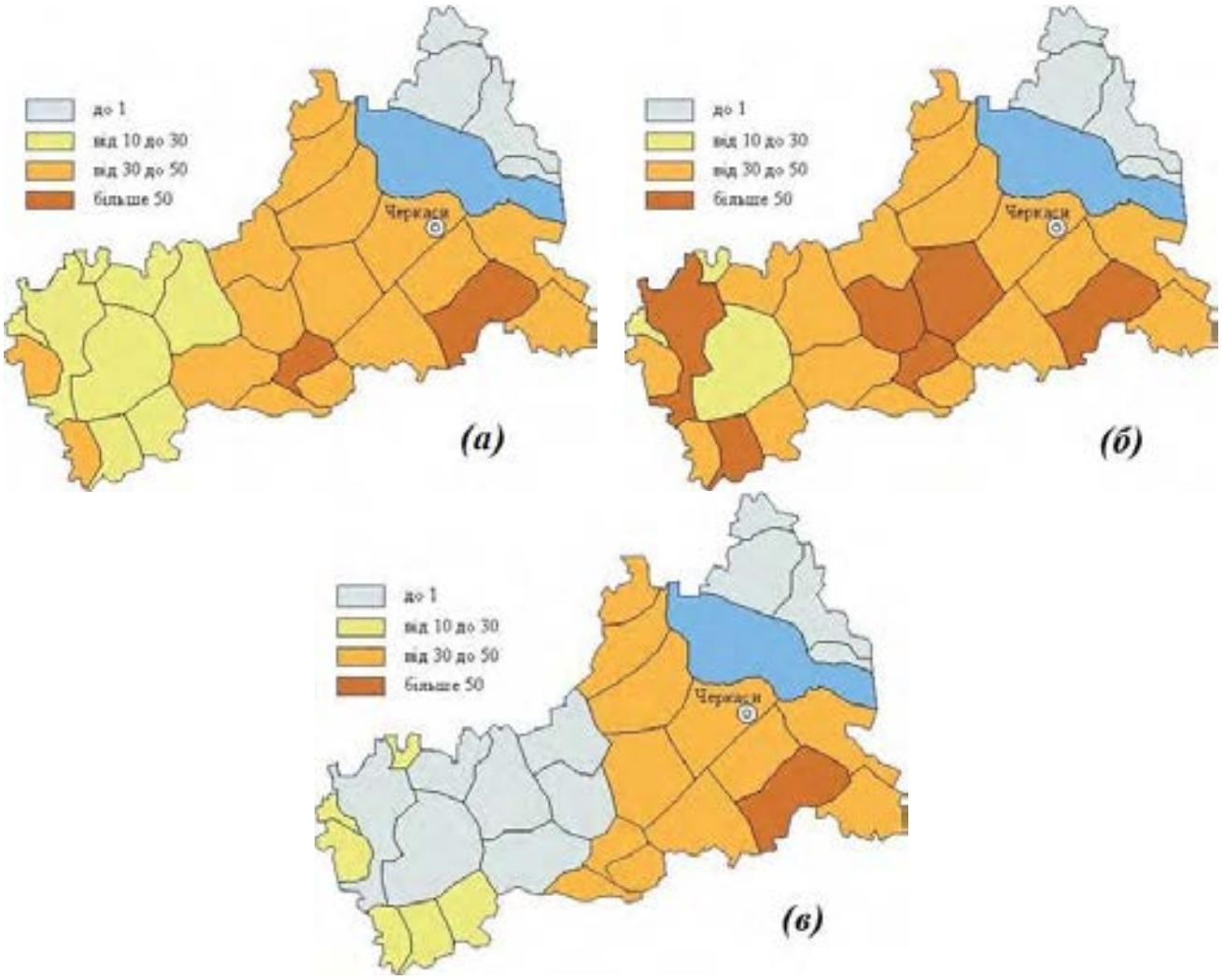


Рис. 6. Карти змін родючості Черкаської області, поточний стан (а); за сценарієм BAU (б) та сценарієм SLU (в), у відносних одиницях / Fig. 6. Maps of fertility changes in Cherkasy region, current state (a); under the BAU scenario (b) and the SLU scenario (c), in relative units

Моделювання змін землекористування в Черкаській області до 2050 року з використанням CLUE-S дозволило оцінити динаміку трансформації земель та її вплив на агрохімічні характеристики ґрунтів. При збереженні поточних тенденцій площа сільськогосподарських угідь збільшиться на 7,5 %, що супроводжуватиметься інтенсивним використанням ґрунтових ресурсів та прискореним виснаженням ґрунтів.

Аналіз змін землекористування показав, що найбільш інтенсивні зміни відбуваються у центральних та південних районах, де сільськогосподарські угіддя розширюються за рахунок природних луків та пасовищ. Водночас спостерігається скорочення лісових насаджень і природних екосистем, що пов'язано з урбанізацією та інтенсифікацією сільського господарства. Очікується, що до 2050 року площа лісів може зменшитися на 3–5 %, що призведе до негативних наслідків для стійкості ґрунтів та біорізноманіття.

Прогнозоване збільшення навантаження на ґрунтові ресурси сприяє їх деградації, особливо в районах інтенсивного землеробства. Аналіз моделі CLUE-S вказує, що у цих регіонах рівень гумусу може знизитися на 5–10 % у найближчі 30 років, що призведе до погіршення фізико-хімічних характеристик ґрунту. Поєднання просторово-динамічного прогнозу CLUE-S та ANN дозволило деталізувати вплив змін землекористування на агрохімічні показники ґрунтів.

Результати ANN показали, що у районах із прогнозованим розширенням ріллі очікується зменшення вмісту гумусу на 8–12 % через прискорену мінералізацію органічної речовини. Найбільш критичні втрати гумусу прогнозуються в центральних районах області, де інтенсивно використовується сільськогосподарська земля. Водночас у східних та південних районах області спостерігається тенденція до підкислення ґрунтів, де рівень pH може знизитися на 0,3–0,5. Це пов'язано з активним використанням мінеральних добрив та природними процесами деградації ґрунтів.

Аналіз динаміки макроелементів показав не-

рівномірний розподіл поживних речовин. У районах із високими аграрними навантаженнями рівень азоту може знизитися на 5–7 %, що вплине на врожайність культур. Вміст фосфору у ґрунті в окремих районах може зменшитися на 10 %, особливо у зонах інтенсивного землеробства, де недостатньо компенсується втрата поживних речовин.

Контроль за рівнем гумусу та pH є ключовим фактором підтримки високої родючості ґрунтів. Аналіз регресійної моделі показав, що збільшення гумусу на 1 % підвищує прогнозовану продуктивність на 1,8 %, а оптимізація pH на одиницю – на 2,1 %. Відхилення цих параметрів від оптимального рівня спричиняє зниження врожайності на 10–15 %. Таким чином, корекція рівня гумусу та кислотності ґрунтів є важливим заходом для підтримки їхньої довгострокової продуктивності.

Зменшення вмісту гумусу не лише знижує врожайність, а й погіршує структуру ґрунту протягом 10–20 років. Дегуміфікація зменшує водоутримання, сприяє ерозії, ущільненню та погіршенню аерації ґрунту, підвищуючи його чутливість до посухи. Крім того, вона знижує активність мікроорганізмів, уповільнюючи мінералізацію органічної речовини та засвоєння поживних елементів [24].

Окрему проблему становить тривале підкислення ґрунту через надмірне використання мінеральних добрив. Це спричиняє накопичення токсичних сполук алюмінію, що гальмують ріст кореневої системи та зменшують засвоєння поживних елементів. Без вапнування та внесення органічних добрив ці процеси можуть стати незворотними [25].

Для оцінки ефективності інтегрованої моделі CLUE-S+ANN було проведено порівняння її точності з іншими традиційними методами прогнозування, зокрема регресійним аналізом (рис. 7).

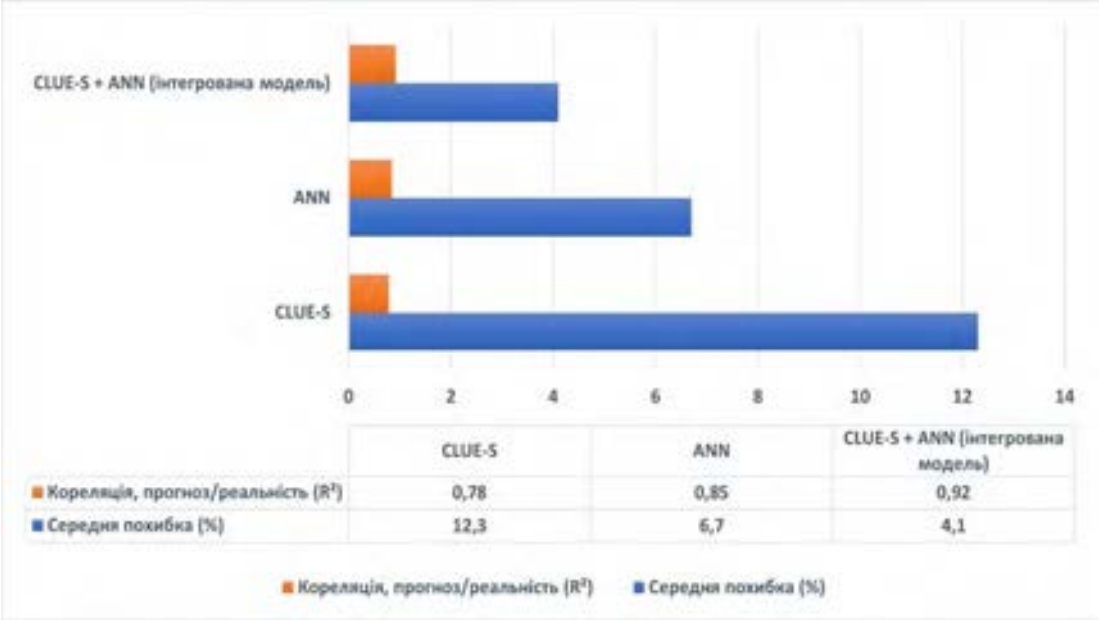


Рис. 7. Порівняння точності прогнозів / Fig. 7. Comparison of forecast accuracy

Порівняння прогнозів за різними підходами продемонструвало, що коефіцієнт детермінації R^2 зріс до 0,92.

Обговорення результатів. Результати показали, що зміни родючості ґрунтів Черкаської області значною мірою залежать від трансформацій землекористування (за моделлю CLUE-S) та просторово-агрохімічних змін, врахованих у ANN. Зокрема, збільшення площ сільськогосподарських угідь у центральних і південних районах на 7,5 % спричиняє виснаження гумусу та підкислення ґрунтів. Аналіз сценарію інтенсивного землеробства (BAU) показав, що при збереженні поточних тенденцій рівень гумусу може знизитися до 2,5 %, а середній pH – до 5,7. Сценарій сталого управління (SLU) демонструє можливість стабілізації родючості; ANN прогнозує зростання гумусу до 4,2 % завдяки оптимізації сівозмін, внесенню органічних добрив і регулюванню кислотності.

Порівняння моделей показало перевагу інтегрованого підходу: CLUE-S мала похибку 12,3 % (R^2 = 0,78), ANN – 6,7 % (R^2 = 0,85), а їх комбінація знизила похибку до 4,1 % і підвищила R^2 до 0,92. Це пояснюється тим, що CLUE-S враховує просторову динаміку змін землекористування, а ANN моделює нелінійні взаємозв'язки агрохімічних показників.

Інтеграція моделей дозволяє врахувати агрохімічні та просторові зміни, а також соціально-економічні фактори, що підвищує точність прогнозів для Черкаської області. Висока коре-

ляція між прогнозованими та фактичними значеннями підтверджує ефективність підходу.

Обмеження дослідження включають: залежність точності від вхідних даних, обмеження CLUE-S на горизонті понад 30 років, специфічність для Черкаської області, недостатню деталізацію впливу кліматичних змін та відсутність економічного аналізу сценаріїв SLU.

Подальші дослідження можуть розширити часовий горизонт прогнозів, включити кліматичні змінні (температура, опади) та економічні фактори в ANN для оцінки агрохімічних і фінансових наслідків змін землекористування.

Висновки. Дослідження показало, що на прогнозування змін родючості ґрунтів найбільше впливають рівень гумусу, pH та концентрації азоту, фосфору й калію. Регресійний аналіз визначив гумус і pH як ключові фактори з коефіцієнтами 1,8 та 2,1. Зниження гумусу нижче 3 % зменшує врожайність на 20–30 %, а відхилення pH від оптимального діапазону 6,2–6,8 ускладнює засвоєння поживних речовин. Комплексний підхід виявив нелінійні взаємозв'язки між агрохімічними показниками: гумус підтримує водний баланс і доступність макроелементів, а кислотність впливає на їхню хімічну активність.

Інтегрована модель CLUE-S та ANN для Черкаської області дозволила точніше прогнозувати вплив змін землекористування. За сценарієм інтенсивного землеробства (BAU) площа угідь збільшується на 6,5–7,5 % до 2050 року, гумус знижується на 8–12 %, а pH падає до 5,7, що може призвести до втрати родючості на 15–20 % у найбільш експлуатованих районах. Сценарій сталого управління (SLU) прогнозує стабілізацію гумусу на 4 % та оптимізацію pH до 6,3, зберігаючи продуктивність ґрунтів.

Порівняння моделей показало, що інтеграція CLUE-S та ANN підвищує точність прогнозів на 14 % ($R^2 = 0,92$) завдяки поєднанню просторового аналізу змін землекористування та врахуванню нелінійних взаємозв'язків агрохімічних показників. Модель може застосовуватися для довгострокових стратегій сталого управління ґрунтовими ресурсами.

Список використаних джерел

1. *Akın A., Erdoğan N., Berberoğlu S., Çilek A., Erdoğan A., Donmez C., Şatir O. (2022). Evaluating the efficiency of future crop pattern modelling using the CLUE-S approach in an agricultural plain. Ecological Informatics, 71.* https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101806
2. *Liao G., He P., Gao X., Lin Z., Huang C., Zhou W., Deng L. (2022). Land use optimization of rural production–living–ecological space at different scales based on the BP–ANN and CLUE–S models. Ecological Indicators, 137.* https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108710
3. *Chu H.-J., Wu C.-F., Lin Y.-P. (2013). Incorporating Spatial Autocorrelation with Neural Networks in Empirical Land-Use Change Models. Environment and Planning B: Planning and Design, 40(3), 384-404.* https://doi.org/10.1068/b37116
4. *Yu Z., Zhao M., Gao Y., Wang T., Zhao Z. & Wang S. (2023). Multiscenario Simulation and Prediction of Land Use in Huaibei City Based on CLUE-S and PLUS Models. Applied Sciences, 13(12), 7142.* https://doi.org/10.3390/app13127142
5. *Pindozzi S. (2017). Predicting land use change on a broad area: Dyna-CLUE model application to the Litorale Domizio-Agro Aversano (Campania, South Italy), Journal of Agricultural Engineering, 48(s1), 27–35.* https://doi.org/10.4081/jae.2017.657
6. *Anputhas M., Janmaat J. J. A., Nichol C. F. & Wei X. (Adam). (2016). Modelling spatial association in pattern based land use simulation models. Journal of Environmental Management, 181, 465–476.* https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.034
7. *Loukika K. N., Keesara V. R., Buri E. S. & Sridhar V. (2023). Future prediction of scenario based land use land cover (LU&LC) using DynaCLUE model for a river basin. Ecological Informatics, 77.* https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102223
8. *Alaboz, P., Odabas, M. S. & Dengiz, O. (2023). Soil quality assessment based on machine learning approach for cultivated lands in semi-humid environmental condition part of Black Sea region. Archives of Agronomy and Soil Science, 69(15), 3514–3532.* https://doi.org/10.1080/03650340.2023.2248002
9. *Wang F., Fan Z., Kuai Y., Sun N., Cheng X., Zhang J., Wang D., Su J., Xu M. (2024). Deciphering Soil Fertility of Tobacco Planting Fields with Back Propagation Artificial Neural Networks in Southwest China. Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 24, 944–955.* http://dx.doi.org/10.1007/s42729-023-01598-5
10. *Pichura V., Potravka L., Stratichuk N., Drobitko A. (2023). Space-time modeling and forecasting steppe soil fertility using geo-information systems and neuro-technologies. Bulgarian Journal of Agricultural Science, 29(1), 182–197.* https://dspace.ksaeu.kherson.ua/handle/123456789/8728
11. *Verburg Peter. (2024). «CLUE Full Version». DataverseNL, V1.* https://doi.org/10.34894/CXAUYO
12. *Verburg P. H. & Overmars K. P. (2009). Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model. Landscape Ecology, 24(9), 1167–1181.* https://doi.org/10.1007/s10980-009-9355-7
13. *Екологічний паспорт Черкаської області (2023). Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України.* https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2024/10/Ekologichnyj-pasport-2023.zip

14. *Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Черкаській області (2021). Управління екології та природних ресурсів Черкаської обласної державної адміністрації.* https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2022/10/Regionalna-dopovid-CHerkaska-ODA-2021.pdf
15. *Фондові матеріали Головного управління Держгеокадастру у Черкаській області (2025).* https://cherkaska.land.gov.ua
16. *Сонько С. П., Кисельов Ю. О., Щетина М. А. (2020). Сільськогосподарське районування Черкаської області в контексті проблеми раціонального використання земельних ресурсів. Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: географія. 48(1), 138-147.* https://doi.org/10.25128/2519-4577.20.1.16
17. *Sopova N., Kyseliova O., Kyselov Yu., Cherednychenko I., Sopov D. (2024). Mapping the erosion damage of agricultural landscapes in Cherkasy region. International Conference of Young Professionals «GeoTerrace–2024». Lviv. Ukraine. 1–5.* https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510082
18. *Парахненко В. Г., Ляховська Н. О., Благополучна А. Г. (2021). Екологічна оцінка стану ґрунту в Черкаській області. Вісник Уманського національного університету садівництва. 2. 91-95.* https://doi.org/10.31395/2310-0478-2021-2-91-95
19. *Sonko S. P. (2018). Express assessment of environmental impact of agriculture technologies on the soils of Cherkasy Oblast. Ukrainian Journal of Ecology. 8(1). 451–459.* https://www.ujecology.com/articles/express-assessment-of-environmental-impact-of-agriculture-technologies-on-the-soils-of-cherkasy-oblast.pdf
20. *Чорний С. Г. (2018). Оцінка якості ґрунтів: навчальний посібник. Миколаїв: МНАУ. 233.*
21. *Третяк А. М., Третяк В. М., Прядка Т. М., Капінос Н. О., Третяк Р. А., Третяк Н. А. (2024). Економіка землекористування та землевпорядкування (ІІ-е доповнене видання в 2-ох частинах). Ч. 1. Економіка землекористування: навчальний посібник. Біла Церква: «ТОВ «Білоцерківдрук». 320.*
22. *Третяк А. М., Третяк В. М., Прядка Т. М., Третяк Н. А. (2022). Територіально-просторове планування землекористування: навчальний посібник. Біла Церква: «ТОВ «Білоцерківдрук». 168.*
23. *Сопов Д. С., Хайнус Д. Д., Бузіна І. М., Макєєва Л. М. (2023). Сучасні механізми управлінського впливу на процес землекористування. «Наукові інновації та передові технології» (Серія «Державне управління», Серія «Право», Серія «Економіка», Серія «Психологія», Серія «Педагогіка»): журнал. 3(17). 59–71.* https://doi.org/10.52058/2786-5274-2023-3(17)-59-71
24. *Trokhymenko G., Litvak S., Litvak O., Andreeva A., Rabich O., Chumak L., Nalysko M., Troshyn M., Komarysta B., Sopov D. (2023). Assessment of iron and heavy metals accumulation in the soils of the combat zone. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 5. 10 (125). 6–16.* https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.289289
25. *Аріон О. В., Купач Т. Г., Дем'яненко С. О. (2021). Основи ґрунтознавства: навчально-методичний посібник. Київ: ВПЦ Київський університет, 327.*

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу
Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Comprehensive forecasting of geospatial changes in soil fertility in Cherkasy region using CLUE-S and ANN models

Nadiia Sopova [1]
Senior Lecturer, Department of Land Management, Geodesy and Cadastre,
[1] State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine;
Roman Olepir [2]
PhD (Agronomy), Associate Professor, Department of Agriculture and Agrochemistry named after V. I. Sazanova,
[2] Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine;
Dmytro Sopov [3]
PhD (Geoscience), Associated Professor, Department of Geodesy, Land Management and Land Cadastre,
[3] Odesa State Agrarian University, Odesa, Ukraine;
Iryna Kyrpychova [4]
PhD (Biology), Associated Professor, Department of Horticulture and Ecology,
[4] Luhansk Taras Shevchenko National University, Poltava, Ukraine;
Kateryna Berezenko [4]
Senior Lecturer, Department of Horticulture and Ecology;
Iryna Cherednychenko [4]
PhD (Agronomy), Associate Professor,
Department of Chemistry, Geography and Earth Sciences;

Nataliia Maslova [5]
PhD (Geography), Associated Professor,
Department of Natural Sciences and methods of their teaching,
[5] Volodymyr Vynnychenko Central Ukrainian State University,
Kropyvnytskyi, Ukraine;
Buzina Iryna [1]
PhD (Agronomy), Associate Professor,
Department of Ecology and Biotechnology in Crop Production;
Makieieva Liudmyla [1]
PhD (Public administration), Associate Professor,
Department of Land Management, Geodesy and Cadastre;
Bubnikovych Alina [6]
Senior Lecturer, Department of Agronomy and Land Management,
[6] Eastern Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl, Kyiv, Ukraine

ABSTRACT

Introduction. This study analyzes soil fertility dynamics in Ukraine's Cherkasy region, considering natural, socio-economic and anthropogenic factors. Soil fertility underpins agricultural productivity, ecological stability and food security, yet is highly sensitive to climate variability, land-use changes, and economic decisions. The research focuses on developing a spatially explicit predictive model to forecast fertility trends, capturing interactions between land use, agrochemical properties (e.g., humus content, pH) and economic drivers of land management. By linking environmental and socio-economic processes, the study provides a tool for informed, sustainable land resource management.

Methods. To achieve this objective, an integrated modeling framework was developed, combining the CLUE-S model, which is designed for spatially dynamic analysis of land-use change, with an artificial neural network (ANN) capable of predicting agrochemical indicators based on climatic, agronomic, and socio-economic data. The CLUE-S component enabled the simulation of land-use transitions and the assessment of spatial patterns of change, while the ANN provided forecasts of humus content and pH levels using historical datasets. This approach allowed for the synthesis of geospatial modeling and data-driven prediction in a unified system. Special consideration was given to socio-economic parameters, including state agricultural policies, the availability of financial resources for the agricultural sector, and prevailing market conditions, ensuring that the modeled scenarios would be both scientifically valid and reflective of real-world constraints.

Results. The modeling revealed that humus content and soil pH are the primary determinants of long-term soil productivity. Under the business-as-usual scenario, where current land-use practices remain unchanged, humus content is projected to decrease by 8–12 % by 2050, while pH levels could fall to 5,7, resulting in a 15–20 % decline in fertility. In contrast, the sustainable land-use scenario, which incorporates optimized crop rotations and practices aimed at maintaining soil organic matter, is expected to stabilize humus content at 4 % and maintain pH levels between 6,3 and 6,5, leading to improved nutrient availability and more efficient use of resources. These results clearly demonstrate the significant potential of targeted land management strategies to mitigate future losses in soil fertility.

Conclusions. The findings confirm the effectiveness of an integrated spatial-predictive modeling approach that combines the CLUE-S model with artificial neural networks for forecasting soil fertility under different environmental and socio-economic conditions. A distinctive feature of this study is its comprehensive inclusion of socio-economic drivers alongside biophysical variables, enabling the development of realistic and policy-relevant projections. The proposed framework has considerable practical value for agricultural landscape planning, the design of sustainable land-use strategies, and the creation of land resource management policies. By enabling the assessment of long-term impacts of land-use change, the optimization of soil resource utilization, and the prevention of degradation, the CLUE-S + ANN model provides a strategic tool for ensuring agricultural productivity and ecological stability in the face of climate change and socio-economic transformations.

Keywords*: land use, soil, soil fertility, forecasting, spatial modeling, CLUE-S, ANN, soil degradation, agrochemical indicators.*

References

1. *Akın A., Erdoğan N., Berberoğlu S., Çilek A., Erdoğan A., Donmez C., Şatir O. (2022). Evaluating the efficiency of future crop pattern modelling using the CLUE-S approach in an agricultural plain. Ecological Informatics, 71. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101806*
2. *Liao G., He P., Gao X., Lin Z., Huang C., Zhou W., Deng L. (2022). Land use optimization of rural production–living–ecological space at different scales based on the BP–ANN and CLUE–S models. Ecological Indicators, 137. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108710*
3. *Chu H.-J., Wu C.-F., Lin Y.-P. (2013). Incorporating Spatial Autocorrelation with Neural Networks in Empirical Land-Use Change Models. Environment and Planning B: Planning and Design, 40(3), 384-404. https://doi.org/10.1068/b37116*
4. *Yu Z., Zhao M., Gao Y., Wang T., Zhao Z. & Wang S. (2023). Multiscenario Simulation and Prediction of Land Use in Huaibei City Based on CLUE-S and PLUS Models. Applied Sciences, 13(12), 7142. https://doi.org/10.3390/app13127142*

5. *Pindozzi S. (2017). Predicting land use change on a broad area: Dyna-CLUE model application to the Litorale Domizio-Agro Aversano (Campania, South Italy), Journal of Agricultural Engineering, 48(s1), 27–35. https://doi.org/10.4081/jae.2017.657*
6. *Anputhas M., Janmaat J. J. A., Nichol C. F. & Wei X. (Adam). (2016). Modelling spatial association in pattern based land use simulation models. Journal of Environmental Management, 181, 465–476. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.034*
7. *Loukika K. N., Keesara V. R., Buri E. S. & Sridhar V. (2023). Future prediction of scenario based land use land cover (LU&LC) using DynaCLUE model for a river basin. Ecological Informatics, 77. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102223*
8. *Alaboz, P., Odabas, M. S. & Dengiz, O. (2023). Soil quality assessment based on machine learning approach for cultivated lands in semi-humid environmental condition part of Black Sea region. Archives of Agronomy and Soil Science, 69(15), 3514–3532. https://doi.org/10.1080/03650340.2023.2248002*
9. *Wang F., Fan Z., Kuai Y., Sun N., Cheng X., Zhang J., Wang D., Su J., Xu M. (2024). Deciphering Soil Fertility of Tobacco Planting Fields with Back Propagation Artificial Neural Networks in Southwest China. Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 24, 944–955. http://dx.doi.org/10.1007/s42729-023-01598-5*
10. *Pichura V., Potravka L., Stratichuk N., Drobitko A. (2023). Space-time modeling and forecasting steppe soil fertility using geo-information systems and neuro-technologies. Bulgarian Journal of Agricultural Science, 29(1), 182–197. https://dspace.ksaeu.kherson.ua/handle/123456789/8728*
11. *Verburg Peter. (2024). «CLUE Full Version». DataverseNL, V1. https://doi.org/10.34894/CXAUYO*
12. *Verburg P. H. & Overmars K. P. (2009). Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model. Landscape Ecology, 24(9), 1167–1181. https://doi.org/10.1007/s10980-009-9355-7*
13. *Ecological Passport of Cherkasy Region (2023). Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2024/10/Ekologichnyj-pasport-2023.zip [in Ukrainian].*
14. *Regional Report on the State of the Environment in Cherkasy Region (2021). Department of Ecology and Natural Resources of the Cherkasy Regional State Administration. https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2022/10/Regionalna-dopovid-CHerkaska-ODA-2021.pdf [in Ukrainian].*
15. *Archival Materials of the Main Department of the State Service of Ukraine for Geodesy, Cartography and Cadastre in Cherkasy Region (2025). https://cherkaska.land.gov.ua [in Ukrainian].*
16. *Sonko S. P., Kyseliov Yu. O., Shchetyna M. A. (2020). Agricultural zoning of Cherkasy region in the context of the problem of rational use of land resources. Scientific notes of the Volodymyr Hnatyuk Ternopil National Pedagogical University. Series: geography. 48(1). 138-147. https://doi.org/10.25128/2519-4577.20.1.16 [in Ukrainian].*
17. *Sopova N., Kyseliova O., Kyselov Yu., Cherednychenko I., Sopov D. (2024). Mapping the erosion damage of agricultural landscapes in Cherkasy region. International Conference of Young Professionals «GeoTerrace–2024». Lviv. Ukraine. 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510082*
18. *Parakhnenko V. G., Lyakhovska N. O., Blagopoluchna A. G. (2021). Ecological assessment of soil condition in Cherkasy region. Bulletin of the Uman National University of Horticulture. 2. 91-95. https://doi.org/10.31395/2310-0478-2021-2-91-95 [in Ukrainian].*
19. *Sonko S. P. (2018). Express assessment of environmental impact of agriculture technologies on the soils of Cherkasy Oblast. Ukrainian Journal of Ecology. 8(1). 451–459. https://www.ujecology.com/articles/express-assessment-of-environmental-impact-of-agriculture-technologies-on-the-soils-of-cherkasy-oblast.pdf*
20. *Chornyi S. H. (2018). Soil Quality Assessment: A Textbook. Mykolaiv: MNAU. 233. [in Ukrainian].*
21. *Tretiak A. M., Tretiak V. M., Priadka T. M., Kapinos N. O., Tretiak, R. A. & Tretiak N. A. (2024). Economics of Land Use and Land Management (2nd expanded edition in 2 parts). Part 1. Economics of Land Use: A Textbook. Bila Tserkva: «Bilotserkivdruk» LLC. 320. [in Ukrainian].*
22. *Tretiak A. M., Tretiak V. M., Priadka T. M. & Tretiak N. A. (2022). Territorial and Spatial Planning of Land Use: A Textbook. Bila Tserkva: «Bilotserkivdruk» LLC. 168. [in Ukrainian].*
23. *Sopov D. S., Khainus D. D., Buzina I. M. & Makieieva L. M. (2023). Modern Mechanisms of Managerial Influence on the Land Use Process. «Scientific Innovations and Advanced Technologies» (Series «Public Administration», Series «Law», Series «Economics», Series «Psychology», Series «Pedagogy»): Journal, 3(17), 59–71. https://doi.org/10.52058/2786-5274-2023-3(17)-59-71 [in Ukrainian].*
24. *Trokhymenko G., Litvak S., Litvak O., Andreeva A., Rabich O., Chumak L., Nalysko M., Troshyn M., Komarysta B., Sopov D. (2023). Assessment of iron and heavy metals accumulation in the soils of the combat zone. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 5. 10 (125). 6–16. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.289289*
25. *Arion O. V., Kupach T. H. & Demianenko S. O. (2021). Fundamentals of Soil Science: A Teaching and Methodological Manual. Kyiv: VPC Kyiv University. 327. [in Ukrainian].*

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 12 July 2025
Accepted 7 November 2025

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-31
UDC 332.7+528.8+631.95

Received 17 October 2025
Accepted 18 November 2025

Challenges and advances in the assessment of damaged agricultural land using remote sensing

Iryna Stakhiv [1]
PhD (Geology), Assistant Professor of the Department of Geoinformatics,
ESI "Institute of Geology", [1] Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine,
e-mail: stakhivira@gmail.com, https://orcid.org/0009-0007-3090-6988;
Vitalii Zatserkovnyi [1]
DSc (Technical), Professor, Head of the Department of Geoinformatics,
e-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com, https://orcid.org/0009-0003-5187-6125;
Olesia Liashchenko [1]
PhD (Philology), Associate Professor,
Foreign Languages Department for Natural Science Faculties,
e-mail: lyashchenko1981@ukr.net, https://orcid.org/0000-0003-4649-3667;
Viktor Vorokh [1]
PhD Student, Department of Geoinformatics,
e-mail: fainkucha@gmail.com, https://orcid.org/0009-0005-0112-8422;
Anna Minzhyner [1]
Student,
e-mail: minziner12@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-8112-7997;
Andrii Klypa [2]
Doctoral Student, PhD (Geology),
[2] Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine,
e-mail: klypa.andrii@gmail.com, https://orcid.org/0009-0006-5565-5305

ABSTRACT

Background. Wartime hostilities have resulted in large areas of Ukrainian land becoming temporarily inaccessible, damaged, or mined, thereby challenging the validity of conventional land valuation approaches, notably the Normative Monetary Valuation (NMV). The current NMV framework is ill-suited for current realities, as it does not incorporate factors such as physical destruction, cratering, and the extent of soil degradation resulting from military operations and the use of missile weaponry. Consequently, an investigation into the relevance and effectiveness of the NMV under martial law is crucial for taxation and for planning the country's reconstruction.

The purpose of the study is to identify challenges in the assessment of damaged land, to substantiate the methodology for its operational monitoring and classification based on remote sensing (RS) data, and to develop practical recommendations for improving the mechanisms of NM through the introduction of a correction coefficient. **The object** of the study is the system of Normative Monetary Valuation of land in Ukraine under martial law. **The subject** is the relevance, effectiveness and challenges of using NMV of land under martial law, as well as ways to improve it.

Methods. This study employs a comprehensive approach, including: a systematic and comparative analysis of the legal and regulatory framework, cartographic modeling, and spatial and statistical data analysis. The key methods were geographic information technologies (GIS) and analysis of satellite images (Planet Labs, Google Earth) for the identification, vectorization and spatial assessment of the affected areas.

Results. It was confirmed that remote sensing is the most effective tool fora large-scale and safe damage assessment, enabling to record craters. During the study, a classification of missiles was developed according to the degree of damage done to the ground. Four main levels of damage were established (Low, Medium, High, and Critical), which correlate with the crater's diameter and depth, as well as with the approximate percentage of soil productivity loss. The introduction of the "Land Suitability Coefficient" (LSC) as a mandatory corrective amendment to the current NMV formula was proposed and justified. It has been established that the LSC should incorporate both the area of damage and the coefficient of destruction intensity (D), obtained on the basis of the classification of remote sensing. Improving the NMV model by incorporating the LSC ensures increased objectivity of the assessment and its compliance with the actual ecological condition of the land, which is necessary for fair land taxation and compensation calculation.

Conclusions. The findings of the study demonstrate the critical need to reform land valuation relations in wartime through the integration of geospatial data. The proposed approach based on remote sensing and the implementation of the LSC is a practical solution that allows authorities and cadastral services to promptly account for losses and fairly regulate financial relations in the field management, thereby contributing to effective planning of the recovery of the agricultural sector.

Keywords*: Normative Monetary Valuation, agricultural land, martial law, land suitability coefficient, geoinformation technologies, remote sensing, assessment of damaged lands, Degree of damage.*

In cites: Stakhiv Iryna, Zatserkovnyi Vitalii, Liashchenko Olesia, Vorokh Viktor, Minzhyner Anna, Klypa Andrii (2025). Challenges and advances in the assessment of damaged agricultural land using remote sensing. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 426-438. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-31 [in Ukrainian]

© Stakhiv Iryna, Zatserkovnyi Vitalii, Liashchenko Olesia, Vorokh Viktor, Minzhyner Anna, Klypa Andrii, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Introduction

The Russian full-scale invasion of Ukraine, which began on February 24, 2022, has caused widespread destruction, significant casualties, and a serious impact on the country's economy [1]. The destruction of infrastructure, reduced production, massive population displacement, and instability of the financial system have significantly affected all areas of economic activity, including land relations. As a result of the hostilities, a significant part of the land has been damaged or temporarily lost to use, which complicates the process of its assessment and management [2].

Under martial law, new challenges arise for local authorities, in particular regarding budget filling, land management and taxation. The Normative Monetary Valuation of land plays an important legal role in the formation of tax revenues. However, its effective application in modern conditions requires addressing several challenges. Changes in legislation, a decrease in economic activity and the destruction of the land fund call into question the relevance of the current valuation methodology, which requires a substantiated analysis and development of new approaches [3].

Research into the relevance and effectiveness of the use of NMV under martial law is extremely important regarding the formation of a substantiated state policy in the land management sector, fair taxation and planning for the reconstruction of the country.

The relevance of the research topic is important given the large-scale and unprecedented consequences of the military aggression of the russian federation, which has led to catastrophic damage to a significant portion of the agricultural land fund of Ukraine. Traditional methods of land assessment and Normative Monetary Valuation (NMV) have proven to be unadopted to new reality, since they: 1) do not take into account physical damage to the soil (shell damage, mine and explosive contamination, soil degradation from chemicals), which dramatically reduces its productivity and usability; 2) are unable to provide prompt, objective and large-scale monitoring of damage over large areas, which complicates fair taxation, compensation to owners and planning of recovery work.

In this context, remote sensing (RS), in combination with geographic information systems (GIS), becomes the only effective tool for: the rapid identification and vectorization of affected areas, the objective classification of damage levels, the integration of current data on the land condition into the state accounting system and the methodology of the NMV (for example, through the calculation of a new corrective suitability coefficient).

Thus, this research is vital for ensuring economic justice (fair taxation and compensation), the effective management of land resources and laying a scientific and methodological foundation for the post-war reconstruction of the country's agricultural sector.

The **purpose** of the study is to identify challenges in the valuation and classification of agricultural land damaged as a result of military aggression, to substantiate the methodology of its monitoring and assessment based on remote sensing (RS) data, and to develop recommendations for improving the NMV system to ensure its compliance with current realities, proposing a new "land suitability coefficient".

Object of the study: the processes of valuating, monitoring and assessing the condition of agricultural land that have been damaged (through destruction, pollution, mining) as a result of military aggression on the territory of Ukraine.

Subject of the study: methods and technologies of remote sensing (RS), their relevance and effectiveness for rapid detection, spatial assessment and classification of the damage levels of agricultural land.

To achieve this aim, the following objectives must be met:

• To analyze the current state and the legal and regulatory challenges of damaged/destroyed agricultural land assessment under martial law.

• To investigate the use of remote sensing methods to monitor changes in land condition.

• To identify the challenges that arise when applying NMV under martial law.

• To develop recommendations for improving the NMV system taking into account modern challenges.

• To investigate the impact of various weapon types on the land and assess the resulting levels of destruction.

• To propose an alternative coefficient for improving the NMV methodology.

Analysis of recent research and publications. When covering the issues of normative monetary valuation (NMV) under martial law, it is extremely important to integrate scientific data on the actual degradation of land resources. Analysis of the study [4], devoted to assessing the impact of the consequences of military actions on soils, serves as a necessary basis for understanding the relevance and error of NMV in combat zones. The authors emphasize the unique value of Ukrainian soils (over 60% are chernozems) and the scale of damage caused by military conflicts. The impact of aggression is multifactorial and causes long-term degradation of soil cover and reduced fertility, which directly affects the real value of land, which should be reflected by the NMV.

Critical to understanding the relevance of the

Normative Monetary Valuation (NMV) is the analysis of methodologies that use the NMV as a baseline indicator for calculating damage. The presented study [5] focuses on this issue, identifying and justifying areas for improving the methodology for assessing damage caused by armed aggression to the land resources and soils. The study [6] is devoted to the analysis and scientific challenges of the NMV methodology for land plots in Ukraine, particularly in the context of the Unified Methodology approved by the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 1147 of November 3, 2021. This methodology aims to simplify existing methods and ensure the valuation of land of all categories and forms of ownership. This study highlights the need for scientific substantiation and improvement of approaches to NMV.

Determining the value of real estate is crucial for various tasks, including taxation, privatization, insurance, land registration and cadastral fees, land reorganization and urban transformation. As countries become more economically developed and the complexity of assessment grows, more accurate assessments become increasingly important.

The works [7-11] present the international experience of real estate valuation. The authors emphasize the crucial importance of accurate determination of precise value for various tasks and the need to use multi-criteria methods (for example, BWM) and GIS technologies to eliminate subjectivity and overcome the shortcomings of traditional valuation methods.

Studies [12-13] examine the valuation and assessment of land parcels, particularly within the agricultural sector. They also highlight the critical challenges of performing such assessments under wartime conditions, including land mining, occupation, physical damage to parcels, and the subsequent need for land conservation**.** Shepel I. justifies the need to improve land accounting practices through the creation of specialized sub-accounts for occupied territories and the development of new reporting forms [13]. The study [14] analyzes the challenges of rational management of disturbed lands using the case of Kryvyi Rih, focusing on degradation caused by anthropogenic factors (mining industry). In the research, a comprehensive approach to reclamation (biological and technical methods) and the need to integrate environmental, economic, and social aspects are justified.

The works [15,7] summarize the impact of military operations on soil degradation and the environment. The authors analyze the main factors affecting soil, water and Nature Reserve Fund (NRF), identifying mechanisms for nature protection. Identifies shortcomings of the current Methodology for assessing damage to the land resources [3]. State that the existing legislative and methodological support does not reflect the content of the necessary recovery work [16]. The authors propose to use several existing standards for calculating damage, but argue for the urgent development of new regulatory and methodological documents and the implementation of legislative changes to realize comprehensive plans for territorial reconstruction. Emphasize the critical state of fertile soils (chornozems) as a result of the war and the need for legislative consolidation of legal methods for regulating reconstruction [17]. The authors argue for an integrated approach (including legislative, environmental, and economic aspects) and the involvement of international assistance for accelerated land reconstruction. Raise the issue of large-scale mining in Ukraine, the most heavily mined territory in the world [18]. The need to develop modern approaches to assessing the priority of humanitarian demining is emphasized in order to return the most promising areas to economic use as a priority [19] show how terrorism and conflicts affect land use, increasing the area of fallow land, increasing the distance to cultivated areas, and reducing the expected value of land. Examine the impact of the land market on the regional development in Ukraine [20]. They emphasize that unlocking the potential of the land market is a significant factor in attracting investment, improving infrastructure, and raising living standards, which is especially important in the context of recovery. The work [21] illustrates how land reform can be used to modernize the agricultural sector and create the prerequisites for autonomous industrial development, breaking the ties of oligarchies with the land.

Traditional methods of property valuation allow for direct comparison of legal, physical and market parameters, but each property is different. Therefore, an alternative method is needed to take these differences into account. While traditional valuation methods– including the comparative, income, and cost approaches– may be sufficient for single properties, they are largely inadequate for valuing multiple properties, a process commonly known as mass valuation

Currently, the Normative Monetary Valuation methodology is irrelevant due to the failure to take into account destruction, cratering and levels of destruction. The modern approach to land valuation does not show the real impact of military operations, only the damage caused by the use of missile weapons and the associated destruction of infrastructure. As a result, the existing methodology does not allow for an adequate assessment of the economic damage caused to the territories that have been destroyed.

Therefore, this methodology requires significant improvement and a wider range of factors, including the type of weapon, the power of the explo-

sion, crater parameters and the severity of the resulting damage.

Methods

The main source of information in this study was the State Land Cadastre (SLC). An important component of the information infrastructure is geographic information systems (GIS), which allow integrating spatial and attribute data. In particular, digital maps, remote sensing data, satellite images and statistical indicators were used for the assessment. The public cadastral map of Ukraine [22] which provides open-access visualization of land plot boundaries,. was also actively used. The integration of these tools allowed for accurate localization of plots and the consideration of specific features such as relief, soil type, and climatic conditions,. This approach significantly enhances the quality and objectivity of the Normative Monetary Valuation.

The existing methodology for analyzing land value does not take into account specific case studies of military operations, in particular, destruction caused by the use of missile weapons. The new approach will allow taking into account both direct damage to the surface layers of the soil and indirect consequences caused by the destruction of infrastructure, and changes in the operational characteristics of the land. This methodology analyzes the type of weapon used, its impact and the approximate parameters of the craters that appeared as a result of explosions. Particular attention is paid to the classification of missiles by the damage levels, which allows for a more accurate use of the scale of destruction at the sites of their use. Calculations are performed considering the specific technical characteristics of the missiles and the land use conditions of the damaged territory. Taking into account situational consequences allows for an accurate adjustment of the land price assessment in accordance with the level of destruction. In addition, the affected area of land plots will be calculated using remote sensing data. This approach will help determine the objective price of the land.

In the standard methodology for conducting the Normative Monetary Valuation (NMV) [23], the value is calculated using the following formula:

$$NMV = A \times N_cri \times K_m1 \times K_m2 \times K_m3 \times K_m4 \times K_lu \times K_su \times K_idx, \quad (1)$$

where:

NMV – Normative Monetary Valuation of the land parcel.

A – Area of the land plot, in square meters.

N_cri – Normative Capitalized Rent Income per unit of area.

K_m1 – Coefficient for location within the influence zone of major cities.

K_m2 – Coefficient for the resort and recreational value of the settlement.

K_m3 – Coefficient for location within radiation contamination zones.

K_m4 – Coefficient for location-specific zonal factors.

K_lu _ Coefficient for the designated land use of the plot (according to the State Land Cadastre).

K_su – Coefficient for specific use features within the primary land category

K_idx _Cumulative Indexation Coefficient, representing the product of annual indexation coefficients from the approval date of the N_cri to the valuation date.

Another coefficient – “Land suitability coefficient” (LSC–was developed -It will be calculated according to the formula:

$$LSC=1-(S_urazh/S_(total) \times D), \quad (2)$$

where

$S_(total)$ – total area of the land plot,

$S_{damaged}$ – area of the affected partof the plot;

D – damage coefficient, which reflects the intensity of destruction.

This indicator reflects the retained suitability of the territory after damage. If the damaged area of the plot is zero, i.e. S_(damage)=0, LSCtakes the value of 1, it indicates the full suitability of the site. Conversely, in cases of severe destruction, when S_(damage) and the coefficient D are high, LSC can significantly decrease, reflecting a significant deterioration in the characteristics of the land. The proposed formula is indicative and can be adapted to specific damage conditions.

The proposed land suitability coefficient LSC, which was calculated by formula 1, can be integrated into the formula for the normative and monetary valuation as an additional multiplier that reflects the real level of damage to the territory. Thus, standard regulatory and monetary parameters are combined with the damage assessment. This approach allows a more accurate reflection of the economic value of the land, particularly after a territory has sustained damage. If LSC=1, this means that no destruction was recorded on the land plot (i.e., D is 0). On the other hand, if LSC is significantly less than 1, this indicates serious damage, which reduces the plot's assessed value. This approach provides a more comprehensive and objective assessment, taking into account the specifics of destructive actions, in particular the use of missile weaponry. The integration of this coefficient into the general formula will contribute to the ongoing calculation of compensation payments and the restoration of economic stability in the affected regions.

The proposed land suitability coefficient (LSC) allows us to take into account not only the area of the affected territory, but also the intensity of destruction, which is an important factor in determining the real value of the land.

The calculation of the land suitability coefficient according to formula 1 allows us to assess the level of land degradation depending on the area of damage and the type of weaponry used.

For example, in the case of precision strikes, when S (damage) is insignificant and the damage coefficient D has a low value, the overall suitability of the land remains high. However, in the case of large-scale destruction that covers a significant part of the territory (high value of S (damage)) and has a severe impact (high value of D), the LSC is significantly reduced, reflecting the loss of economic and business value of the land.

The use of LSC in the formula of regulatory and monetary assessment provides not only a more accurate calculation of the value of the land plot, but also creates a basis for developing mechanisms for compensating landowners and tenants for damages. Including this factor in the NMV allows for the establishment of a fair value of land for taxation, lease or sale, taking into account its actual condition after the damage. his is particularly relevant for agricultural land, since even partial contamination or mining of land can significantly limit its use and affect productivity.

Results

Over the course of almost 900 days, more than 4,500 missiles have been fired across the territory of Ukraine, excluding S-300/S-400 missiles [24]. In order to fully understand the damage caused by missile strikes to the ground, a possible classification of missiles was developed. Classification of missiles by the level of damage is an effective tool for assessing the identified impact of missile attacks on objects and the population. Using the indicative levels presented in the table, experts can calculate the scale of destruction by considering factors such as the power of the explosion, the parameters of the missile carriers, as well as local terrain characteristics. Such calculations not only allow documenting the consequences of the use of missile weapons, but also contribute to the formation of an objective evidence base for further analysis of the situation. It should be noted that the presented degrees of formation are approximate, they consider the variety of conditions of use and the design features of the missile. Table 1 below reflects the main categories of damage levels, which provide the basis for further research and subsequent legal analysis of the position.

Table 1

Levels of land damage

Level of damage	Diameter of the crater, m	Depth, m	Approximate % loss of soil productivity
Low	2-5	0,5-1,5	10-30% (local damage to the topsoil)
Medium	5-10	1,5-3	30-60% (deep destruction of the humus layer, partial salinization of the soil)
High	10-15	3-5	60-90% (significant mixing with mineral rocks, formation of unsuitable craters)
Critical	15+	5+	90-100% (complete destruction of the soil, possible releaseof toxic elements)

Based on the data from Table 1, an analysis was made of the main types of missiles that the russian federation uses on the territory of Ukraine, and the level of damage for each type was determined. The results are presented in Table 2.

The study of the types of damage relative to the used weapons showed significant differences in the scale and nature of the destruction. Analysis of missile strikes reveals that their immense power and the rapid propagation of their impact cause the most

Table 2

Example of damage rating assignment for some missiles

Rocket type	Degree of damage	Soil damage assessment (%)	Average soil damage (%)
Kh-22 Burya	High - Critical	70-100%	85
Kh-32	High	60-90%	75
Iskander-M (9M723)	High	60-90%	75
Kalibr 3M-14	Medium – High	40-70%	55
Kh-59	High	60-90%	75
Kh-69	High	60-90%	75

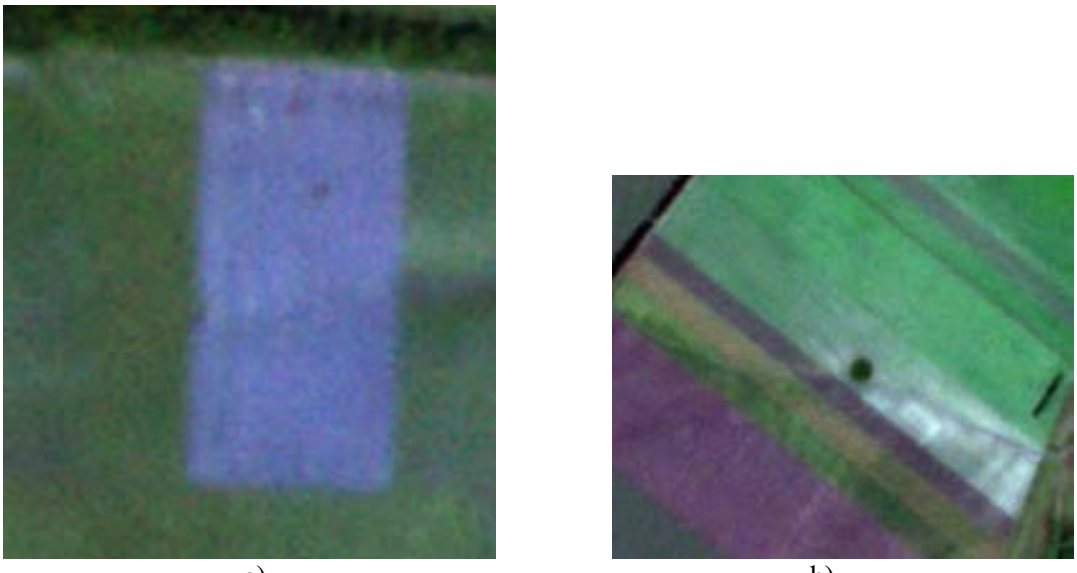
devastating consequences. Classification of missiles by the damage levels allows for the more accurate definition of the category of damage and enables us to calculate the approximate parameters of explosion craters. The use of modern calculation methods based on the latest scientific and technological achievements is key to an objective assessment. The obtained data provide an opportunity to form an evidentiary base for further investigation of war crimes and bring the perpetrators to justice. An independent examination that considers the specifics of different weapon types ensures the objectivity of judicial proceedings. The results of the study open up prospects for improving the methods of analyzing the consequences of rocket attacks. A comprehensive approach to damage assessment involves the integration of technical calculations, expert opinions and practical experience. Such research is important for rapid response in emergency situations.

The study was based on the analysis of high-spatial resolution satellite images and the use of open geospatial resources to identify, visualize, and spatially assess changes in areas affected by armed conflict. This approach allowed us to obtain an objective picture of the damage without physical access to the study area.

At the first stage, satellite images were selected from the Planet Labs platform [25], which, within the framework of the Education and Research Program, provided access to archival and daily images with a spatial resolution of up to 3 meters. This enabled the authors to detect even minor damage that could have been overlooked when using medium-resolution images. However, due to the current military situation, the process of obtaining up-to-date satellite data was accompanied by several complications. In order to confirm the detected changes, an additional source was used - Google Earth [26], which contains a chronology of high-resolution panoramic images. The comparative analysis included a comparison of satellite images before and after the alleged damage.

Particular attention was paid to careful visual analysis, since some of the changes could be barely noticeable or mixed with natural or anthropogenic objects (e.g., plowing, harvesting, temporary structures). Therefore, only those areas where signs of damage were clearly recorded, as well as those where satellite images before and after the event were available for reliable comparison, were selected for further processing.

It also should be noted that the image processing required careful manual analysis of each case, as automatic geolocation of impacts is absent or inaccurate. As a result, identifying even individual instances of damage required sequential examination of time-lapse images, coordination with other sources, and synchronization of data for further vectorization within the GIS platform. Figure 1 shows the land plots that were damaged.



a) b)

Fig. 1. Visualization of damage to land plots:
a) Poltava region (08/28/2023); b) Dnipropetrovsk region (06/22/2023)

In order to clarify the boundaries of the affected land plots and ensure the spatial accuracy of the research results, open geodata from the Public Cadastral Map of Ukraine resource was used. The involvement of this resource made it possible to link the damage detected on satellite images with officially registered land plots, which made it possible to conduct further analysis at the legal and functional level.

This process also made it possible to assess whether the damage affected officially registered land tenures, and, accordingly, to determine the potential

legal, economic or environmental consequences.

However, several problems and limitations arose during the research. First of all, the Public Cadastral Map does not allow direct export of vector layers, so it was decided to digitize the boundaries of the affected areas manually. This process required considerable time and concentration, as the boundaries had to be reproduced based on coordinates and visual reference to satellite images. Particularly challenging were the cases where the boundaries of cadastral areas had an unclear or fragmentary display on the map, which forced additional verification with adjacent areas or reference to archival sources.

Despite these difficulties, manual digitization provided high accuracy of spatial boundaries (Fig. 2), which is extremely important for subsequent stages of work - in particular, for building buffer zones, calculating affected areas, and assessing damage.

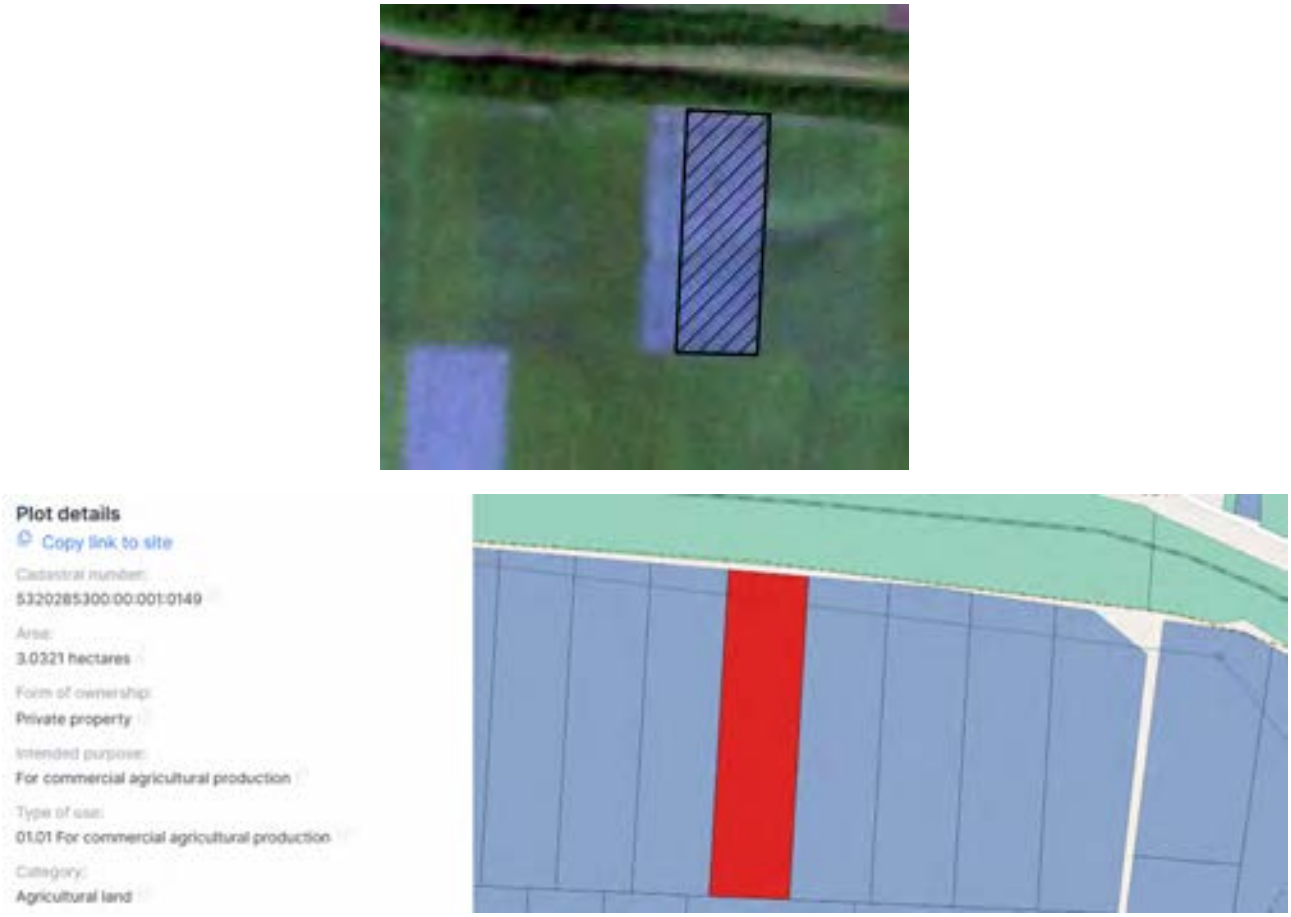


Fig. 2. Vectorized boundaries of land plots in Poltava region (08/28/2023)

The next stage of the study was the buffering of the impact areas (Fig. 3), which involves the creation of a spatial impact zone of a certain fixed width around each object. In the context of the analysis of the consequences of hostilities, the buffer zone is used to take into account not only the directly affected territories, but also adjacent areas that could potentially be affected by secondary impacts - for example, due to a shock wave, debris, fire or chemical contamination. In this study, an average buffer zone radius of 250 meters was used. This indicator is a compromise between the safety requirements proposed by international mine action standards and practical data from open sources on the impact zones of missile weaponry [27]. On average, this distance allows for covering territories that, according to open satellite materials, often have visual signs of secondary damage, even if the immediate epicenter of the explosion is located outside the cadastral area.

This approach allows us to take into account the incompleteness of satellite data, as well as those areas that may have been affected, but do not have obvious visual changes in the images due to the resolution limitations or the atmospheric conditions during image acquisition. This corresponds to the approaches used in environmental expertise and engineering assessment of territories, where the consequences of explosions are assessed not only at the site of impact but also within their radius of spatial influence [26].

For automated calculation of the area of all buffer zones, the Raster Calculator in the QGIS 3.40.6 environment was used. Buffer polygons were

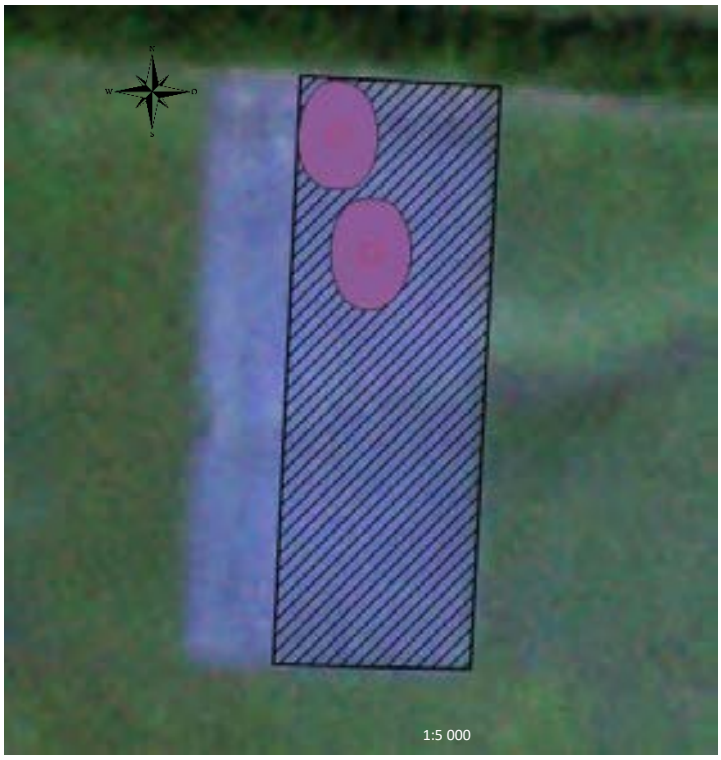


Fig. 3. Buffering of affected areas, using the example of Poltava region

previously converted to raster format, after which the total area of impact over the study area was determined using classification and taking into account the resolution of the layer. In cases where several buffers overlapped the boundaries of one cadastral plot, the calculation was performed manually. This allowed us to avoid duplication of areas, especially in areas with a dense concentration of affected objects.

Table 3

Calculated areas of damage

Plot	Date of damage	Region	Settlement	Area affected, ha
1	04.06.2022	Odesa region	v. Protopopivka	0,032514
2	26.07.2022	Odesa region	v. Bilenke	0,076960
3	31.07.2022	Odesa region	v. Bilenke	0,002988
4	22.06.2023	Dnipropetrovsk region	v. Mykhailo-Zavodske	0,147724
5	27.06.2023	Poltava region	v. Sosnivka	0,503918
6	28.08.2023	Poltava region	v. Hoholove	0,021366
7	28.08.2023	Dnipropetrovsk region	v. Chervona Poliana	0,014286
8	13.06.2024	Mykolaiv region	v. Mishkovo-Pohorilove	0,071029
9	11.07.2024	Odesa region	v. Moldovanka	0,071162
10	19.07.2024	Sumy region	v. Sadove	0,024914

These data allow for an accurate assessment of the potential consequences of damage for each land tenure, taking into account the spread of the risk zone beyond the initial explosion.

Within this stage of the study, a full-scale assessment of ten land plots located within the territories affected by active hostilities was conducted. The main goal of the analysis was not only to perform a basic calculation of the Normative Monetary Valuation (NMV), but also to take into account the impact of the actual degree of destruction of each plot on its economic value.

The calculation of NMV was carried out in accordance with the current Methodology approved by the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 105 of 03.03.2021. The basic NMV

values for the studied plots ranged from ₴42,500 to ₴48,900 per hectare, which is typical for a region with an average level of fertility and moderate infrastructure accessibility.

In order to adapt the assessment results to the real conditions of martial law, a land suitability coefficient (LSC) was introduced - a numerical indicator reflecting the usability of a land plot after being damaged by hostilities (see Formula 1).

The calculation of the adjusted value of the NMV was carried out according to formula 3:

$$NMVadj.=NMV\times LSC, \quad (3)$$

where

NMV is the standard Normative Monetary Valuation, calculated according to the current Methodology; approved by the Resolution of the Cabinet of Ministers No. 105 of 03.03.2021;

LSC is the Land Suitability Coefficient of the land plot.

Table 4

Calculation of the suitability coefficient of a land plot

Region	Settlement	Total area (ha)	Area affected (ha)	Strike ratio	Kpz
Odesa region	v. Protopopivka	5,2	0,032514	0,75	0,995310
Odesa region	v. Bilenke	5,9	0,076960	0,75	0,990217
Odesa region	v. Bilenke	3,6	0,002988	0,85	0,999295
Dnipropetrovsk region	v. Mykhailo-Zavodske	7,4	0,147724	0,85	0,983032
Poltava region	v. Sosnivka	30	0,503918	0,85	0,985722
Poltava region	v. Hoholove	3	0,021366	0,55	0,996083
Dnipropetrovsk region	v. Chervona Poliana	5,2	0,014286	0,55	0,998489
Mykolaiv region	v. Mishkovo-Pohorilove	15,7	0,071029	0,75	0,996607
Odesa region	v. Moldovanka	11,5	0,071162	0,75	0,995359
Sumy region	v. Sadove	4,2	0,024914	0,75	0,995551

In the absence of official technical documentation that would certify the current state of the studied areas (since the assessment was not ordered by an authorized state institution), the source of information was open Internet resources. In particular, for spatial analytics, the Public Cadastral Map of Ukraine, Google Earth, interactive satellite images, as well as photo documentation of territories available through open data sources were used.

Based on the analysis of these materials, a scale of destruction was formed, which included the damage coefficient of the land plot ranging from 0.50 to 0.85, corresponding to an estimated loss of 15% to 50% of the land's productive value. The application of the Land Suitability Coefficient to each plot reflects the individual level of its suitability after the military impact.

It should be noted that due to the lack of technical documentation based on field surveys and land condition survey reports, the authors cannot guarantee the absolute reliability of the results obtained. All calculations were made solely on the basis of publicly available information, which does not guarantee accuracy in accordance with state standards for land valuation. At the same time, in the opinion of the authors, the used sources are sufficiently substantiated for conditional modeling of the situation and formulation of objective conclusions within the framework of this scientific research.

The final results of the analysis of ten plots showed that the average decrease in NMV as a result of the application of the LSC was about 34%, which indicates a significant loss of economic suitability and investment attractiveness of agricultural land in the affected areas.

Based on the comparative analysis (Table 5), it can be concluded that the average level of losses in the economic value of agricultural land in the combat zone is approximately 34%. This indicates a significant degradation of the economic potential of the territories, which must be taken into account when forming tax policy, providing compensation, and planning recovery measures.

Thus, the proposed approach to taking into account the destruction coefficient is an effective tool for modifying the current methodology of normative monetary valuation, ensuring adaptation to martial law conditions and supporting a fair approach to the reconstruction of the agricultural sector.

Conclusions

The existing Normative Monetary Valuation (NMV) methodology for land has proven to be ill-adapted to the realities of martial law, as it does not take into account the destruction, cratering, and var-

Table 5

Comparison of land tax reductions after adjusting the NMV methodology

Region	Settlement	NGO, UAH	Tax, UAH	NGOSkor, UAH	Tax, UAH	Difference, UAH
Odesa region	v. Protopopivk	848 440	101 813	844 461	101 335	477
Odesa region	v. Bilenke	505 731	60 688	500 783	60 094	594
Odesa region	v. Bilenke	308 582	37 030	308 364	37 004	26
Dnipropetrovsk region	v. Mykhailo-Zavodske	450 789	54 095	443 140	53 177	918
Poltava region	v. Sosnivka	2 425 045	291 005	2 390 421	286 850	4 155
Poltava region	v. Hoholeve	202 087	24 250	201 295	24 155	95
Dnipropetrovsk region	v. Chervona Poliana	303 500	36 420	303 041	36 365	55
Mykolaiv region	v. Mishkovo-Pohorilove	885 849	106 302	882 843	105 941	361
Odesa region	v. Moldovanka	985 747	118 290	981 172	117 741	549
Sumy region	v. Sadovo	235 930	28 312	234 880	281 86	126

ying levels of soil degradation caused by hostilities and missile strikes. This leads to an inadequate assessment of economic damage and complicates fair taxation and compensation for damages.

Remote sensing of the Earth (RS), in particular the use of high-resolution satellite imagery (Planet Labs, Google Earth), is a key and most effective tool for identifying, visualizing, and spatially assessing affected areas. This approach allows for an objective picture of damage without physical access to dangerous areas.

The study developed a classification of missiles by the level of damage they cause to the ground. As a result, four main damage levels have been established (Low, Medium, High, Critical), which correlate with the diameter and depth of the crater, as well as with the approximate percentage of soil productivity loss (for example, for the Kh-22 Buria missile, the average soil damage is estimated at 85%).

Furthermore, a Land Suitability Coefficient (LSC) was proposed. The calculation of the LSC takes into account the area of the affected part of the site (S damage) and the damage coefficient (D), which reflects the intensity of destruction (depending on the type of weapon). The integration of the LSC into the NMV formula provides a more accurate calculation of the cost of the site, taking into account both the area of damage and the intensity of destruction.

The proposed model allows to increase the accuracy of the assessment, to ensure fair tax assessment, and facilitates a reasonable determination of losses for agricultural lands. The results of the study are important for improving the efficiency of land management and establishing a scientific and methodological basis for the post-war reconstruction of the territories.

Bibliography

1. *Stakhiv, I., Zatserkovnyi, V., De Donatis, M., Pastushenko, T., Hordiichuk, S., & Malik, T. (2025). Spatial analysis of the flooded land area of the Kherson Region Nature Reserve using remote sensing data. Visnyk Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology, (2), 1–14. DOI: https://doi.org/10.17721/1728-2713.109.14*
2. *Войтюк, Д., & Єрмолаєва, Т. (2023). Наслідки впливу військових дій на стан навколишнього природного середовища. Grail of Science, 28, 122-129. DOI https://doi.org/10.36074/grail-of-science.09.06.2023.19*
3. *Trofimenko P., Minzhener A., Zatserkovnyi V., Stakhiv I., Kobylynska S. (2024). Cartographic and analytical assessment of land price formation depending on the physical and geographical conditions of the territory under military aggression in Ukraine. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (61), 259-271. DOI: https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-21*
4. *Сакун А. О., Кутковий Д. О. (2025). Оцінка впливу наслідків військових дій на грунти. Екологічні науки. 1 (58), 350-353. DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.1-58.56*
5. *Кучер, А. (2022). Методика оцінювання збитків, завданих збройною агресією земельному фонду та ґрунтам: проблеми та напрями вдосконалення. Journal of Innovations and Sustainability, 6(2), 1-9 DOI: 10.51599/is.2022.06.02.10*
6. *Вольська, А. (2022). Наукові проблеми методики Нормативної грошової оцінки земельних ділянок в Україні. Naukovì Perspektivi. DOI: https://doi.org/10.52058/2708-7530-2022-3(21)-131-144*
7. *Ayalke, Z., and Sisman, A. (2022). Nominal Land Valuation with Best-Worst Method Using Geographic Information System: A Case of Atakum, Samsun. ISPRS International Journal of Geo-Information, 11(4), 213. DOI: https://doi.org/10.3390/ijgi11040213*

8. Yalpır, Ş., & Ünel, F. B. (2022). Multivariate statistical analysis application to determine factors affecting the parcel value to be used mass real estate valuation approaches. International Journal of Engineering and Geosciences, 7(1), 32-42. DOI: https://doi.org/10.26833/ijeg.862563
9. Bencure, J. C., Tripathi, N. K., Miyazaki, H., Ninsawat, S., & Kim, S. M. (2022). Factors affecting decision-making in land valuation process using AHP: a case in the Philippines. International Journal of Housing Markets and Analysis, 15(1), 188-202. DOI: https://doi.org/10.1108/IJHMA-11-2020-0136
10. Mete, M. O., & Yomralioglu, T. (2021). Implementation of serverless cloud GIS platform for land valuation. International Journal of Digital Earth, 14(7), 836-850. DOI: https://doi.org/10.1080/17538947.2021.1889056
11. Son, N. P., Van Manh, L., Thuy, N. T., Vu, T. N., Hanh, N. T., & Linh, L. P. (2020). Factors that affect land values and the development of land value maps for strengthening policy making in Vietnam: the case study of non-agricultural land in Quang Ninh province, Vietnam. EQA-International Journal of Environmental Quality, 36, 23-35. DOI: https://doi.org/10.6092/issn.2281-4485/9771/
12. Мустеца І. (2025). Оцінка та облік земельних ділянок в умовах воєнного часу. Фінансово-кредитні системи: перспективи розвитку. 2(17). 132-142. DOI: https://doi.org/10.26565/2786-4995-2025-2-11
13. Шепель, І. (2025). Удосконалення обліку земельних ресурсів у сільському господарстві: проблеми, виклики та шляхи вирішення. Науковий вісник Ужгородського національного університету Серія: Міжнародні економічні відносини та світове господарствост, 179-186 DOI: https://doi.org/10.32782/2413-9971/2025-54-28
14. Перегудов, В. В., Березан, Є. Ю., & Паламар, А. Ю. (2025). Аналіз досліджень і шляхів раціонального використання порушених земель на прикладі міста Кривого Рогу. Науковий вісник будівництва, (112), 233-240. DOI: https://doi.org/10.33042/2311-7257.2025.112.1.28
15. Kucher, A. (2022). Методика оцінювання збитків, завданих збройною агресією земельному фонду та ґрунтам: проблеми та напрями вдосконалення. Journal of Innovations and Sustainability, 6(2), 1-23.
16. Третяк, А. М., Третяк, В. М., Капінос, Н. О., Гетьманчик, І. П., & Третяк, Р. (2022). Землевпорядкування та оцінка нанесеної шкоди землекористуванню на територіях, що зазнали військових дій в Україні. DOI: https://doi.org/10.32702/2306-6792.2022.11–12.3
17. Покальчук, М. Ю., Марачук, А. В., & Шулепова, О. О. (2024). Правове забезпечення заходів повоєнного відновлення земельних ресурсів України. Аналітичне-порівняльне правознавство ДВНЗ «УжНУ» – Ужгород, №6, 455-461. https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/71147
18. Беспалько, Р., Гуцул, Т. ., Казімір, І., & Мирончук, К. (2023). Сучасні підходи до оцінювання черговості гуманітарного розмінування територій. Технічні науки та технології, 1 (31), 146–157. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-1(31)-146-157
19. Adelaja, A., & George, J. (2019). Terrorism and land use in agriculture: The case of Boko Haram in Nigeria. Land Use Policy, 88, 104116. DOI: https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104116
20. Дугієнко, Н., & Ланг, В. (2023). Вплив ринку землі на регіональний розвиток України. Економіка та суспільство, (56). DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-56-72
21. Saleth, R. M. (1991). Land reform under military: Agrarian reform in Peru, 1969-78. Economic and Political Weekly, PE85-PE92. https://www.jstor.org/stable/41498500
22. Публічна кадастрова карта України. Публічна кадастрова карта України. Режим доступу: https://kadastrova-karta.com/ (дата звернення: 07.03.2025).
23. Постанова Кабінету Міністрів України "Про затвердження "Методики нормативної грошової оцінки земельних ділянок" №1147. (2021). Київ. Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1147-2021-%D0%BF#Text (дата звернення: 05.05.2025).
24. Marsh, N. (2023). Responding to needs: military aid to Ukraine during the first year after the 2022 invasion. Defense & Security Analysis, 39(3), 329–352. DOI: https://doi.org/10.1080/14751798.2023.2235121
25. Planet Explorer. Режим доступу: https://www.planet.com/explorer/ (дата звернення: 05.03.2025).
26. Google Earth. Режим доступу: https://earth.google.com/web/ (дата звернення: 01.05.2025).
27. IMAS. (2020) International Mine Action Standards. KMMCS – Übersicht. Режим доступу: https://www.mineactionstandards.org/standards/ (дата звернення: 12.05.2025).

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

References

1. Stakhiv, I., Zatserkovnyi, V., De Donatis, M., Pastushenko, T., Hordiichuk, S., & Malik, T. (2025). Spatial analysis of the flooded land area of the Kherson Region Nature Reserve using remote sensing data. Visnyk Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology, (2), 1–14. DOI: https://doi.org/10.17721/1728-2713.109.14
2. Voytyuk, D., & Yermolaeva, T. (2023). Consequences of the impact of military actions on the state of the natural environment. Grail of Science, 28, 122-129. DOI: https://doi.org/10.36074/grail-of-science.09.06.2023.19 [in Ukrainian]
3. TrofimenkoP., MinzhenerA., ZatserkovnyiV., StakhivI., KobylynskaS. (2024). Cartographic and analytical assessment of land price formation depending on the physical and geographical conditions of the territory under military

aggression in Ukraine. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (61), 259-271. DOI: https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-21

4. *Sakun A. O., Kutkovy D. O. (2025). Assessment of the impact of military actions on soils. Ecological Sciences. 1 (58), 350-353. DOIhttps://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.1-58.56. [in Ukrainian]*
5. *Kucher, A. (2022). Methodology for assessing damage caused by armed aggression to land and soil: problems and areas for improvement. Journal of Innovations and Sustainability, 6(2), 1-9 DOI: https://doi.org/10.51599/is.2022.06.02.10 [in Ukrainian]*
6. *Volska, A. (2022). Scientific problems of the methodology of Normative monetary valuation of land plots in Ukraineю. Naukovì Perspektivi. DOI: https://doi.org/10.52058/2708-7530-2022-3(21)-131-144. [in Ukrainian]*
7. *Ayalke, Z., and Sisman, A. (2022). Nominal Land Valuation with Best-Worst Method Using Geographic Information System: A Case of Atakum, Samsun. ISPRS International Journal of Geo-Information, 11(4), 213. DOI: https://doi.org/10.3390/ijgi11040213*
8. *Yalpır, Ş., & Ünel, F. B. (2022). Multivariate statistical analysis application to determine factors affecting the parcel value to be used mass real estate valuation approaches. International Journal of Engineering and Geosciences, 7(1), 32-42. DOI: https://doi.org/10.26833/ijeg.862563*
9. *Bencure, J. C., Tripathi, N. K., Miyazaki, H., Ninsawat, S., & Kim, S. M. (2022). Factors affecting decision-making in land valuation process using AHP: a case in the Philippines. International Journal of Housing Markets and Analysis, 15(1), 188-202. DOI:https://doi.org/10.1108/IJHMA-11-2020-0136*
10. *Mete, M. O., & Yomralioglu, T. (2021). Implementation of serverless cloud GIS platform for land valuation. International Journal of Digital Earth, 14(7), 836-850. DOI: https://doi.org/10.1080/17538947.2021.1889056*
11. *Son, N. P., Van Manh, L., Thuy, N. T., Vu, T. N., Hanh, N. T., & Linh, L. P. (2020). Factors that affect land values and the development of land value maps for strengthening policy making in Vietnam: the case study of non-agricultural land in Quang Ninh province, Vietnam. EQA-International Journal of Environmental Quality, 36, 23-35. DOI: https://doi.org/10.6092/issn.2281-4485/9771/*
12. *Musteca, I. (2025). Valuation and accounting of land plots in wartime conditions. Financial and credit systems: development prospects. 2(17). 132-142. DOI: https://doi.org/10.26565/2786-4995-2025-2-11 [in Ukrainian]*
13. *Shepel, I. (2025). Improving land resource accounting in agriculture: problems, challenges and solutions. Scientific Bulletin of Uzhhorod National University Series: International Economic Relations and the World Economy, 179-186 DOI: https://doi.org/10.32782/2413-9971/2025-54-28 [in Ukrainian]*
14. *Peregudov, V. V., Berezan, E. Yu., & Palamar, A. Yu. (2025). Analysis of research and ways of rational use of disturbed lands on the example of the city of Kryvyi Rih. Scientific Bulletin of Construction, (112), 233-240. DOI: https://doi.org/10.33042/2311-7257.2025.112.1.28 [in Ukrainian]*
15. *Kucher, A. (2022). Methodology for assessing damages and losses caused by the armed aggression to the land fund and soils: problems and directions of improvement. Journal of Innovations and Sustainability, 6(2), 1-23. [in Ukrainian]*
16. *Tretiak, A., Tretiak,V., Kapinos, N., Hetmanchyk, I., Tretiak, R. (2022). Land planning and assessment of damage to land use in territories affected by military action in Ukraine. DOI: https://doi.org/10.32702/2306-6792.2022.11—12.3 [in Ukrainian]*
17. *Pokalchuk, M., Marachuk, A., Shulepova, O. (2024). Legal support for post-war reconstruction measures of land resources of Ukraine. Analytical and Comparative Jurisprudence. (n.d.). SHEI "UzhNU", 6, 455-461. https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/71147 [in Ukrainian]*
18. *Bespalko, R., Hutsul, T., Kazimir, I., & Myronchuk, K. (2023). Modern approaches to assessing the priority of humanitarian demining. Technical sciences and technologies, 1 (31), 146–157. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-1(31)-146-157*
19. *Adelaja, A., & George, J. (2019). Terrorism and land use in agriculture: The case of Boko Haram in Nigeria. Land Use Policy, 88, 104116. DOI: https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104116*
20. *Duhiienko, N., Lang, V. (2023). Impact of the land market on the regional development of Ukraine, (56). DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-56-72. [in Ukrainian]*
21. *Saleth, R. M. (1991). Land reform under military: Agrarian reform in Peru, 1969-78. Economic and Political Weekly, PE85-PE92. https://www.jstor.org/stable/41498500*
22. *Public Cadastral Map of Ukraine. Available at: https://kadastrova-karta.com/ (retrieved: 07.03.2025). [in Ukrainian]*
23. *Cabinet of Ministers of Ukraine. (2021). On approval of the Methodology for normative monetary evaluation of land plots. (Decree No. 1147). Kyiv. Available at: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1147-2021-%D0%BF#Text (retrieved: 05.05.2025). [in Ukrainian]*
24. *Marsh, N. (2023). Responding to needs: military aid to Ukraine during the first year after the 2022 invasion. Defense & Security Analysis, 39(3), 329–352. DOI: https://doi.org/10.1080/14751798.2023.2235121*
25. *Planet Explorer. Retrieved from: https://www.planet.com/explorer/ (retrieved: 05.03.2025).*
26. *Google Earth. Retrieved from: https://earth.google.com/web/ (retrieved: 01.05.2025).*
27. *IMAS. (2020) International Mine Action Standards. KMMCS – Übersicht. Retrieved from: https://www.mineactionstandards.org/standards/ (retrieved: 12.05.2025).*

Проблеми та шляхи удосконалення обліку пошкоджених сільськогосподарських угідь методами ДЗЗ

Ірина Стахів [1]
к. геол. н., асистент кафедри геоінформатики, ННІ «Інститут геології»,
[1] Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна;
Віталій Зацерковний [1]
д. тех. н., професор, зав. кафедри геоінформатики;
Олеся Лященко [1]
к. філол. н., доцент, кафедра іноземних мов природничих факультетів;
Віктор Ворох [1]
аспірант кафедри геоінформатики;
Анна Мінжинер [1]
студентка;
Андрій Клипа [2]
докторант, к. геол. н.,
[2] Київський національний університет будівництва і архітектури,
Київ, Україна

Земельні відносини завжди відігравали ключову роль у розвитку економіки України, особливо в аграрному секторі. Одним із основних інструментів регулювання цих відносин є нормативно-грошова оцінка земель (НГО), яка використовується при оподаткуванні, передачі земельних ділянок у власність чи користування, а також у процесах планування територій. Проте, в умовах воєнного стану, спричиненого повномасштабною збройною агресією, система НГО зазнала значних викликів. Руйнування інфраструктури, мінування територій, часткова або повна недоступність земель для використання, зміна функціонального призначення ділянок – усе це потребує переосмислення існуючих підходів до оцінки земельних ресурсів. У роботі розглянуто проблему актуалізації методики нормативної грошової оцінки земель в умовах воєнного стану. Автором запропоновано новий підхід до розрахунку НГО, який включає альтернативну поправку, що враховує не тільки економічні показники, а й екологічні характеристики та рівень придатності земель. У роботі використано методи аналізу законодавства, математичного моделювання та геоінформаційних технологій. Удосконалено модель розрахунку НГО, що забезпечує підвищення точності оцінки земельних ділянок на 12–15% шляхом включення альтернативної поправки з урахуванням екологічного стану і функціонального призначення земель. Апробація моделі здійснена на прикладі земельних ділянок Харківського району. Результати підтвердили підвищення точності оцінки та її відповідність сучасним умовам використання земель. Результати дослідження можуть бути використані органами місцевого самоврядування, державними установами та під час оновлення кадастрових баз даних для підвищення ефективності земельної політики. Уперше запропоновано включення комплексного екологічного коефіцієнта до формули НГО, що дозволяє більш об’єктивно враховувати природні фактори у процесі оцінки земель.

Ключові слова*: нормативна грошова оцінка, сільськогосподарські угіддя, воєнний стан, коефіцієнт придатності земельної ділянки, геоінформаційні технології, ДЗЗ, облік пошкоджених земель, ступінь ураження.*

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу
Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 17 жовтня 2025 р.
Прийнята 18 листопада 2025 р.

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-32
УДК 911.2:664.1
Надійшла 5 червня 2025 р.
Прийнята 18 вересня 2025 р.

Ландшафтні сліди і палімпсести в індустріальній культурно-історичній спадщині

Юліан Тютюнник
д. геогр. н., професор, старший науковий співробітник
Державного політехнічного музею імені Бориса Патона
при НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна
e-mail: yulian.tyutyunnik@gmail.com, http://orsid.org/0000-0002-1621-6362

Серед об'єктів культурно-історичної спадщини розрізняють ландшафтні сліди – певні трансформації елементів, компонентів, структури і образів ландшафту, які були обумовлені діяльністю людини, що припинилася, кардинально змінилася або сильно редукувалася. У разі нашарування в ландшафті слідів, утворених однією чи декількома причинами на різних часових проміжках, треба говорити про ландшафтний палімпсест. Слід і палімпсест –передумова ландшафтом якостей культурного (напр., історичного, археологічного, меморіального, архітектурного). Вони є предметом охорони і зберігання, об'єктами культурно-історичної спадщини. Про ландшафтні сліди у пост-техногенних промислових і гірсько-промислових слід говорити як про індустріальні. Якщо вони у пост-техногенному ландшафті накопичуються і нашаровуються, такий ландшафт набуває якостей палімпсесту. Індустріальні ландшафтні сліди і палімпсести мають вважатися предметом охорони і збереження – як пам'ятки науки і техніки (категорія «пам'ятка науки і техніки» є юридично унормованою). Індустріальні сліди і палімпсести складаються як з матеріальних предметів, пов'язаних з виробничою діяльністю, так і з ідеальних явищ та феноменів, зв'язаних з життям і побутуванням робітного люду, видатними постатями науковців, інженерів, технологів. Ідеальна складова індустріального сліду у промисловому, гірсько-промисловому пост-техногенному ландшафті складаєься зі сленгу і фольклору, співів і музики, легенд та забобонів, звичок, радицій, топонімів, прізвищ трударів тощо. Повноцінне збереження об'єктів культурно-історичної спадщини в її виробничому «варіанті» вимагає тотального врахування матеріальних та ідеальних складових індустріального ландшафтного сліду та палімпсесту. Його може забезпечити ландшафтний підхід щодо охорони пам'яток науки і техніки. В статті представлений досвід та проблеми відносно ідентифікації, вивчення, збереження індустріальних слідів і палімпсестів в пост-техногенних ландшафтах, які були утворені цукробуряковим виробництвом (Вінницька, Житомирська, Київська, Черкаська, Чернігівська області), склоробством (Закарпаття), урано-добуванням (Кривбас). Всі вони є індустріальною спадщиною нашої Вітчизни і потребують обліку, дослідження, охорони.

***Ключові слова**: індустріально-ландшафтний слід, посттехногенний ландшафт, ландшафтний палімпсест, цукрозаводська, склоробна, урано-добувна культурно-історична спадщина України.*

Як цитувати: Тютюнник Юліан (2025). Ландшафтні сліди і палімпсести в індустріальній культурно-історичній спадщині. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*, (63), 439-450. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-32

In cites: Tyutyunnyk Yulian (2025). Landscape traces and palimpsests in industrial cultural and historical heritage. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 439-450. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-32 [in Ukrainian]

Вступ. Ландшафтний підхід в царині охорони культурно-історичної спадщини реалізується у трьох взаємопов'язаних, але методично дещо відмінних, напрямках. 1. Охорона ландшафту, як такого, у зв'язку з тим, що він сам по собі є об'єктом спадщини (наприклад, природні сакральні ландшафти[1]). 2. Охорона культурно-історичного об'єкту в його автентичному середовищі, котре може й не бути пам'яткою (історії, культури, природи), але необхідне для повноцінного збереження тієї пам'ятки, яку воно оточує, вміщує (звичайно така пам'ятка є окремим елементом ландшафту). 3. Тоді, коли культурно-історична пам'ятка, будучи штучною за походженням, має різнобічні якості, серед яких є такі, котрі слід зберігати й охороняти. Пункт «3» найчастіше застосовують по відношенню до такої пам'яткознавчої категорії, як пам'ятка містобудування. Вона передбачає збереження не лише архітектурних споруд, а й порядку їх розпланування на території, елементів рельєфу, озеленення, водних об'єктів, видових точок розкриття пейзажу тощо. Взагалі ландшафтний підхід у пам'ятко-охоронній справі сьогодні вже набув значної популярності і на практиці довів, що може бути різноманітно та ефективно застосованим [4, 6, 8 та ін.].

Ландшафтознавче вивчення об'єктів культурно-історичної спадщини має включати в себе щонайретельніше нюансування всіх без винятку субстанцій, фактів, процесів як матеріальної, так й ідеальної природи впритул до геосимулякрів і геопоезії. Це не проста задача. Її складність підсилюється, коли мова заходить про ландшафт не просто культурно-історичний, а виробничої культури, індустріальної спадщини. Адже виробничі і гірсько-промислові ландшафти за давньо-

[1] Звичайно це ландшафти так званої *змішаної спадщини* – природної і культурно-історичної водночас. Поняття змішаної спадщини офіційно вживається в документах ЮНЕСКО, у Списку Всесвітньої спадщини. Першим ландшафтом змішаної форми спадщини у Списку стали незайманні священні праліси народу маорі (Нова Зеландія)

© Тютюнник Юліан, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

мільковською (1970-ті рр.) методологічною традицією, котра поки що переважає у вітчизняному ландшафтознавстві, зазвичай вважаються «акультурними». Це означає, що їхні права на збереження та охорону виявляються урізаними, а самі вони набувають шкідливого «відтінку» маргінальності і неповноцінності. Тим не менш історико- та культур-ландшафтознавчий підходи щодо індустріальних територій і об'єктів виробничої спадщини існують і розвиваються вже не перше десятиліття [5, 12, 13, 15, 19, 20]. Це надихає на подальші теоретичні розробки й емпіричні дослідження, аспекти яких подаються в цій статті. Одним з непересічних аспектів є теорія ландшафтно-індустріальних слідів і ландшафту-палімпсесту та досвід її практичного застосування в історико-ландшафтознавчих та пам'ятко-охоронних вишукуваннях.

Методи дослідження. 1. Порівняльно-історичний і палеоландшафтознавчий. 2. Індустріально-археологічний з акцентом на археологічно-грунтознавчий. 3. Історико-герменевтичний (сутнісний аналіз ідеальних процесів й алюзій минулого у зв'язку з формами їхніх актуальних проявів як нематеріальної індустріальної спадщини). 4. Дистанційний з використанням електронних картографічних баз Інтернету, зокрема ресурсу http://OldMaps.dp.ua. 5. Соціологічно-польовий: інтерв'ю, переписка, бесіди, живе спілкування с особами – носіями історичної пам'яті місця (ветерани праці, місцеві мешканці, містечкова інтелігенція, представники етнічних меншин).

Теоретичні засади (методологія) роботи. Одним з ефективних і найцікавіших способів застосування ландшафтного підходу в сфері вивчення, охорони й використання культурно-історичної та природної спадщини, є *палеоландшафтознавчий* – в широкому, а не лише в геолого-історичному, сенсі поняття «палео-». Оскільки ландшафт – утворення як просторове, так і часове, то в його структурі, якостях, властивостях, складі, образах і геосимулякрах записуються всі ті процеси, що мали місце в минулому. Якщо це минуле має суспільну природу, то знаходимо запис в ландшафті історичних подій, в розумінні історії як суспільної науки. Відповідно виникає *ландшафт історичний* – з різним ступенем просторової і часової градації подій історії. Запис останніх відбувається як на матеріальних носіях (елементи, компоненти, геогоризонти ландшафту, його фізичні процеси і властивості) так і на ідеальних (ім'я, образ, чит, символ, знак, алюзія, ремінісценція, асоціація). Якщо цей запис йде тривалий час, відбиває якісно різні періоди, моменти соціальної і природної історії, то матеріальні й ідеальні носії запису подій накладаються і зберігаються у ландшафті *пошарово*, тим самим надаючи йому якостей *палімпсесту* (в геології це звуть *стратиграфією*). «Палімпсестність» давно відома в ландшафтознавстві під різними-іншими назвами, як то ландшафт «палео-», «реліктовий», «історичний», «археологічний», «меморіальний», «у́спадкований» та «о́спадкований» тощо, в підсумку – «ландшафт-палімпсест» (або ландшафт як палімпсест). Ступінь ясності, зрозумілості, чіткості тих текстів, що різними онтологічними способами записуються у часових шарах ландшафту, залежить від чіпкості цих шарів щодо подій, а також від проміжків часу, який минув від того моменту коли події мали місце. Літогенна і технолітогенна[2] чіпкість геогоризонтів ландшафту, здебільшого підповерхневих, є найміцнішою і «на виході» дає нам науку *археологію*. Людські події, що мали місце у ландшафті, можуть забуватися на протязі життя одного покоління, але можуть жити і тисячоліття. Узагальнюючи та об'єднуючи всі відтінки та риси палімпсестності ландшафту і віддаляючи їх у минуле, яке актуально безпосередньо не зчитується (палімпсест, як і текст, має зчитуватися), ми пропонуємо вживати поняття *ландшафтного сліду*. Застосовуючи поняття ландшафтного сліду до залишків ландшафтів промислових, агропромислових і транспортних, які вже чималий термін не виконують свої первинних функцій і перетворюються в *руїнні*, *пост-техногенні ландшафти*, отримуємо категорію *індустрія́льно-ландшафтного сліду* чи *індустріального сліду в ландшафті* [11, 12]. Серед сучасних пам'ятко-охоронців певної популярності набула досить радикальна точка зору, згідно якій наявність в ландшафті індустріального сліду «автоматично» надає йому якості ландшафту культурного [15].

Руїна споруди, решткі металевих конструкцій, фрагменти транспортної й інженерної інфраструктури та інші свідоцтва, залишені у ландшафті його колишніми техногенними елементами і компонентами, ще не є власне слідами: це безпосередні пам'ятки і пам'ятування, які час ще не перетер на порох. Ландшафти, що з них складаються, або їх включають у значній кількості, радше слід розуміти як *пост-техногенні* ландшафти, а не ландшафти-сліди. Звичайно, пост-техногенні ландшафти також можуть мати і часто мають статус пам'ятки: меморіальної, науково-технічної, архітектурної та ін. По мірі сплывання часу, будь який пост-

[2] Маються на увазі так звані *техноліти* – кам'янисті, щебінчасті, а також землисті (глинисті, піскові) субстрати, що є рештками споруд, будівель, конструкцій, доріг, невикористаної технологічної сировини і продукції (кокс, агломерат, скло тощо), твердих і напівтвердих відходів виробництва (шлак, шлам, дефекат і т.ін.).

техногенний ландшафт набуває якостей нерухомої пам'ятки історії, найчастіше – *історії науки і техніки*. Фаза власне індустріально-ландшафтного сліду приходить пізніше, коли пост-техногенний ландшафт докорінно трансформується процесами природного самовідновлення (їх звуть *екологічною демутацією*) і для своєї ідентифікації вимагає вже не простого споглядання і констатації факту (руїни заводу, наприклад), а прискіпливого вивчення тих якостей і властивостей місцевості, що виникли завдяки діяльності давнього промислового об'єкту, але сьогодні вже є мало помітними і далеко неочевидними. Інший шлях перетворення промислового пост-техногенного ландшафту в ландшафт-слід – зміна *соціальної функції* місця: колишній промайданчик стає, наприклад, сельбищною територією, на давніх відвалах розбивається парк а в кар'єрі створюється штучне озеро, або вся промзона тотально ревіталізується, музеєфікується, перетворюється в культурно-просвітницький простір, скансен тощо. Від індустріальної минувшини залишаються лише спогади та, можливо, якісь виробничі рештки в шарах земних…

Наявність у ландшафтному сліді залишків руїн і техногенних решток, зокрема технолітів, припустима, а іноді і необхідна, але не лише ними визначається ландшафт-слід, як такий. Колишній техногенний ландшафт, переходячи у фазу сліду, репрезентується новоутвореними рельєфом, похованими грунтами-індустріоземами, незвичайними фітоценозами й нехарактерними для даної місцевості рослинами, гідрографічною мережею (джерела, ручаї, канали, ставки, копані, озера), а також ідеальним наповненням: топонімікою, прізвищами мешканців, робітничим сленгом і фольклором, легендами і переказами, музикою, танцями, піснями (рис. 1). Навіть гастрономічні вподобання робітного люду [18] і «сакральні» приписи народної медицини, що практикувалася у робітничих поселеннях [17], сьогодні вважаються формами нематеріальної індустріальної спадщини. При комплексному підході, будь-яке ідеальне «наповнення» пост-техногенного ландшафту є його невід'ємною частиною, і це абсолютно відповідає базовим принципам ландшафтознавства. Ландшафтні сліди вже досить давно, хоча можливо і без належної артикуляції, розглядаються в *історичному ландшафтознавстві* [10] і *археології ландшафту* [16].

Результати дослідження й обговорення. Перші віднайдені нами у географічній літературі спроби історичного читання ландшафтно-індустріальних слідів належать Давиду Лівінгстону.



Рис. 1. Мистецький гурт *NUBERU* збирає, зберігає і популяризує музичну спадщину астурійських гірників та металургів: концерт робітничої пісні на 26-х Міжнародних читаннях, присвячених індустріальній спадщині Астурії, які щорічно проводяться організацією INCUNA («*In*dustria, *Cu*ltura, *Na*turaleza»), в місті Хіхон (Іспанія), 2024 р. / Fig. 1. The NUBERU artistic group collects, preserves and popularizes the musical heritage of Asturian miners and metallurgists: a concert of workers' songs at the 26th International Readings dedicated to the industrial heritage of Asturias, held annually by the organization INCUNA («*In*dustria, *Cu*ltura, *Na*turaleza»), in the city of Gijón (Spain), 2024 year

У одній зі своїх африканських подорожей в 1850-х рр., спостерігаючи черговий подорожній ландшафт, він зазначив: “Знову і знову трапляються нам руїни великих міст, що містили єдині ієрогліфи цієї країни у вигляді стертих жорен з великими кварцовими шматками, за допомогою яких робилося розмелювання зерна. Такі шматки кварцу лежали усюди у великій кількості, показуючи, що спустошення цих міст було результатом війни; якби мешканці пішли звідсіля мирно, то вони, звичайно ж, забрали б їх з собою” [7, с. 334]. Уважний погляд дослідника на нічим не особливі техноліти – залишки жорен, дав можливість Лівінгстону зробити важливі історичні висновки. Свої міркування видатний географ вклав в середині 19 ст. – у розпал Промислової революції: про індустріальну спадщину тоді мова ще й не розпочиналась. Власне пам’яткоохоронне відношення до решток заводів і фабрик почало з’являтися пізніше. Перша з таких ремінісценцій відносно території сучасної України, яку ми віднайшли в літературі, належить відомому наприкінці 19 – поч. 20 ст. вітчизняному інженеру-цукровару Н.А. Пакульському. Про руїни цукроварні в селі Макошине (нині смт Макошине) Чернігівської губернії в 1901 році він писав: “Ще до сих пір вціліла частина кам’яної будівлі цього заводу як пам’ятник першому заснованому в губернії заводу” [9, с. 3]. Йдеться про одну з перших українських цукроварень – Макошинську, вона постала у 1825 р.

Індустріальні сліди цукрових заводів. Чудовий художній опис цукрозаводського ландшафтного сліду, філігранно поєднуючи антропогенно-техногенні, природні і соціальні аспекти, залишив нам класик латиноамериканської літератури Сіро Алегрія: “Оці порепані шматки міцно утрамбованої глини були колись цукровим заводом, а зараз усе навкруги заросло і потонуло в листі молодих дерев. Великий круглий камінь з канавками губиться в траві; колись по ньому, видавлюючи сік із тростини, ходили дерев’яні жорна, які повільно крутили воли. Руїни печей, над якими колись кипіли наповнені соком мідні казани, випаровуючи медовий запах, заросли бур’яном. Попереду, на схилах, що спускаються до пампи, і в самій пампі жовтіли стебла цукрової тростини. А тепер дика і буйна рослинність завоювала цей край, і тут більше не пахне медом, зораною землею і солодкою тростиною. Вітер розносить аромати соковитих стовбурів і гілля, різкі пахощі пишного цвітіння, ледь чутний аромат смол. Може, колись саме на цьому місці, де звівся пишний гуаланго, засинали стомлені люди. Ось тут, напевне, після стомлюючого дня, вони стелили собі постіль і в сні бачили здійснення своїх надій. А тепер канал, проритий з долини, пересох, і тростина висохла. Її замінив ліс. <…> Від давніх зусиль людей не лишилося нічого” [1, с. 322].

Наведемо деякі приклади ландшафтно-індустріальних слідів у цукрозаводській спадщині України.

В 2008-2016 і 2022 рр. ми дослідили [5,12] ландшафті сліди, утворені природною демутацією руїн таких цукрових заводів: у Вінницькій обл. – Дзюньківського (1845 – 1922) в с. Дзюнків, Заливанщинського (1883 – 1925) в селищі Первомайське, Северинівського (1871 – 1929) в с. Северинівка, П'ятківського (сер. 1820-х – сер. 1840-х) біля с. П'ятківка, Бершадського (сер. 1820-х – поч. 1860-х) на хуторі Вóрони біля м. Бершадь; у Житомирській обл. – Іванківського (1876 – 1928) в с. Іванків, Топорівського (1858 – поч. 1920-х) в с. Топори, Таверівського (1860 – поч. 1920-х) в с. Ходорків, Яроповичського (1859 – поч. 1920-х); в Київській обл. – Півецького (поч. 1840-х – 1923) в с. Півці, Велико-Пріцьківського (1847 – 1923) в с. Великі Пріцьки; в Черкаській обл. – Бучакського (1822 – 1831) в с. Бучак, Орловецького (1834 – 1907) в с. Орловець, Атем'ївського (1858 – поч. 1920-х) в с. Степанці, Трощинського (1832 – поч. 1920-х) в с. Трощин; у Чернігівській обл. – Бобровицького-І «Кочубеївського» (1837 – 1858) в м. Бобровиці, Макошинського (1825 або 1858 – поч. 1900-х) у смт Макошине і Стольненського (1838 – поч. 1860-х) у с. Стольне. Також до категорії слідів було віднесено заводські ландшафти й ландшафтні елементи на територіях колишніх цукрових заводів в м. Монастирище (Черкащина), м. Ржищеві і селі Пії (Київщина), але утворилися вони не в результаті демутації, а в результаті зміни виробничої функції місця: на територіях цих трьох цукроварень виникли інші підприємства, а значить утворилися промислові ландшафти іншого ґатунку. Від цукроварень же лищилися тільки слід.

Аналіз рясного польового матеріалу показав, що індустріальні сліди цукрозаводських ландшафтів репрезентуються такими матеріальними й ідеальними складовими.

Техноліти. Цукрозаводські техноліти мають дуже узна́ваний, можна сказати, *діагностичний* характер. В гурті це: а) світло-сірі, білі шматки вапнякового каміння та/або обпаленого вапна різного ступеня вивітрилості (на старих проммайданчиках – значної); б) чорні і темно-сірі камінці вугілля та/або вугільної золи; в) шматки цегли. Суміш цих трьох субстанцій – вірний вказівник місця розташування давньої цукроварні. Це, звичайно, не означає, що вапняк, вуглини і цегла зустрічаються обов’язково разом в будь яких пунктах проммайданчика, але на його території загалом – як правило (рис. 2).





↑
бій цегли і вапнякове каміння на місці розташування цеху виходять на денну поверхню / brickwork and limestone stones at the location of the workshops come to the surface

гашене вапно на місці розташування вапнякової ями, → перекрите новоутвореним грунтом / slaked lime at the location of limestone pits are covered with newly formed soil

Рис. 2. Техноліти ландшафтно-індустріального сліду від цукрового заводу у селі Великі Пріцькі Київської обл., завод закинутий у 1923 році / Fig. 2. Technoliths of the landscape-industrial trace from the sugar factory in the village of Velyki Pritskyi, Kyiv region, the plant was abandoned in 1923 year.

Одразу після руйнації цехів і заводських корпусів техноліти утворюють *кам'янистий бедлен* (і відповідно ландшафти «кам'янистого бедленду»). З часом камінний хаос заростає травами і чагарниками, перекривається дрібноземом, вивітрюється. Далі він стає літогенною (техноліто-генною) основою у формуванні діагностичного генетичного горизонту заводських грунтів – індустріоземів, який ми запропонували позначати «FR» [11, 14].

Рельєф. В пост-техногенному цукрозаводському ландшафті на субстраті з технолітів формуються своєрідні форми рельєфу (пост-техногенний морфогенез), котрі, зберігаючи пам'ять («пам'ять рельєфу») про індустріальну минувшину, з часом успадковуються ландшафтним слідом. Одразу після руйнації заводу на кам'янистому бедленді утворюється *ямково-горбистий* мікрорельєф, складений переважно новітніми технолітами. Останні, по мірі розвитку на них діагенетичних і ґрунтоутворюючих процесів, формують *комірчасто-кучугурові* форми мікрорельєфу. На місцях колишніх жомових ям виникають своєрідні прямокутні *заглиблено-коритоподібні* форми. Де були відстійники, розвиваються спочатку заболочені, потім перезволожені візерунки *валкуватих понизь*. Але на глибоких стадіях демутації вони в значній мірі нівелюються. Відвали дефекату перетворюються у *пасмові* і *плато-подібні підвищення* висотою 2 – 5 м. На ділянках, де сконцентровані технологічні порожнечі підземних комунікацій, а останні дуже характерні для цукроварень, розвиваються *техногенні понори*, *провалля*, *сліпо-ерозійні рівчаки* і навіть *карстові лійки* – в місцях накопичення невикористаного вапнякового каменю. Подекуди мікрорельєф колишніх проммайданчиків цукроварень набуває незвичайних і дивних форм, наприклад, на місцях колишніх бурачних можуть утворюватися оригінальні видовжені *секційно-комірково-пасмові заглиблення* [11, 12]. Розшифровувати текст слідового мікрорельєфу в пост-індустріальному ландшафті, визначаючи де що колись розміщувалося, – цікаве, чи не дізнавальне заняття.

Грунти. Однією з найхарактерніших рис *грунтів-індустріоземів*, що утворюються в межах проммайданчиків, взнаються по діагностичному горизонту FR і продовжують існувати в пост-техногенних промландшафтах та в ландшафтно-індустріальних слідах, є їхня дуже висока строкатість і плямистість у плані. Малюнок грунтових педонів та парцел на території і актуального і колишнього проммайданчика є примхливим, контрастним, хитромудрими – різко відмінним від такого довколишньої поза-

індустріальної місцевості, навіть якщо вона має складні природні літолого-геохімічні та гідрогеологічні умови. Також для індустріоземів характерним є високе розмаїття літологічного і геохімічного складу. Генезиси технолітів та індустріоземів тісно спряжені. Грунтові профілі індустріоземів здебільшого складні, багатошарові, іноді поховані, але при уважному їх зчитуванні можна не тільки реконструювати етапи історії і події, що мали місце у цукрозаводському ландшафті минулого (наприклад, пожежі), а й віднайти давно загублені місця розміщення заводу, як це мало місце при встановленні локації легендарної цукроварні «Кочубея» в м. Бобровиці Чернігівської обл. [12, с. 313-315].

Рослинність. Як індикатор виробничої минувшини, рослини проявляють себе рідко. Навпаки, у вирішальній мірі саме завдяки екологічній демутації, «нашестю» рудеральної, синантропної, згодом зональної рослинності, колись ясно виражений пост-техногенний ландшафт позбавляється своєї індустріальної фізіономічності і набуває ознак сліду. Але в окремих випадках поодинокі старі дерева і навіть садово-паркові композиції можуть зберігатися від давніх-давен цукрозаводського життя, для якого в 19 ст. було характерне улаштування біля а то і на самих проммайданчиках невеликих, а іноді і великих, парків, скверів, алей. Якщо такі рослинні угрупування дожили до наших днів, то також стали «літерами», «словами» і навіть «реченнями» цукроварно-ландшафтного палімпсесту. В якості показового прикладу можна навести здичавілий передзаводський парк Заливанщинського цукрозаводу (закинутий в 1925 р.) або столітні дуби в селищі Бродецької цукроварні (закинутої в 2010-х рр.).

Ставки. Цукроваріння було і залишається водоємним виробництвом. Рідко можна зустріти цукровий завод без штучної водойми, здебільшого ставка на річечці чи ручаї. Кількість ставків навколо цукроварні може сягати чотирьох (з-д ім. Т.Г. Шевченка в селі Денехівка, Київщина). Іноді ставки розміщуються прямо на проммайданчику (Шамраївський з-д в селі Руда Київської обл.), але частіше є суміжними з проммайданчиком. Ставки – дуже сильний і чіпкий елемент цукроварно-ландшафтної пам'яті: виробництво давним-давно зникло, а став, колись влаштований для забезпечення технологічного циклу цукроваріння, залишився і впевнено продовжує повторювати: «Біля мене був завод!». Навіть коли став зник, але лишилися свідчення його існування, наприклад, картографічні, він продовжує виконувати роль індикатора розміщення цукроварні на цій території. У нашій практиці таке трапилося при ідентифікації місця знаходження давно – з середини 1840-х рр. – не існуючої П'ятківської цукроварні, що на Вінничині [5].

Економічна історія, мистецтво, топоніміка. Ландшафтні палімпсести насичені самими різними знаками і читами, що відбиті не в природних або штучних артефактах, а в географічних образах, символах, симулякрах, текстах, мелодіях тощо. Їхні місця – як території колишніх заводів, так і приміщення музеїв, сторінки книг, людська пам'ять і мова, котрі до певного терену фізично можуть бути і не «прив'язаними». Розмаїття знаків і читів культури, якими у сферу ідеального залучається ландшафтний текст і палімпсест, потужне як сама культура. Ось три приклада.

1. З цукроварінням пов'язані долі, діла й імена багатьох видатних, історичних, знаних осіб нашої історії. До сих пір місцеві мешканці можуть говорити про цукроварню свого села, містечка «завод Терещенка», «цукровня Браніцької», «цукроварня Бродського» тощо, при тому що носії цих прізвищ давно вже побутують лише на сторінках підручників та книг з історії. Найперший цукровар України Йосип Гнатович Понятовський був родичем останнього польського короля Станіслава Августа Понятовського. В 1822 р. в селі Бучак (Канівщина) він заснував перший в Україні цукрозавод. Його сини Євген і Цезарій продовжили батьківську справу. Перша династія українських цукроварів мала польську королівську кров. Багато-багато чого в українській економічній, соціально-політичній, військовій історії пов'язано з відомими прізвищами осіб, які розбудували вітчизняне цукроваріння – Бобринських, Браніцьких, Бродських, Грохольських, Кочубеїв, Кушельових-Безбородьків, Мошинських, Потоцьких, Ржевуських, Симиренків, Собанських, Терещенків, Ханенків, Щеньовських, Яхненків та інших відомих в Україні родин 19 – поч. 20 ст.ст.

2. Вище було наведено уривок з прози С. Алегрії, в якому проникливо описується ландшафтний слід тростинно-цукроварного заводу. На рис. 3 показані два полотна наївного (народного) живопису, на яких зображені види Великo-Пріцьківського (с. Великі Пріцькі, Київська обл.) та Устянського (с. Устя, Вінницька обл.) цукробурякових заводів. Від першого залишився індустріальний слід, другий з 1990-х рр. лежить у руїнах і є досить сильно демутованим пост-техногенним ландшафтом. А на картинах живі цукроварні образи минулого продовжують жити, являючи нам давно не існуючі промислові ландшафти.

3. Топоніми, пов'язані з індустріальною минувшиною, є, напевно, самими чіпкими і стійкими у часі читами цукрозаводських ландшафтних палімпсестів; іноді вони набувають сили і чіпко-



с. Великі Пріцькі, Київщина /
village of Velyki Prits'ki, Kyiv region



с. Устя, Віннитчина /
village of Ust'ya, Vinnitsa region

Рис. 3. Зниклі цукроварні на полотнах народних малярів в сільських музеях /
Fig. 3. Disappeared sugar mills on the canvases of folk painters in rural museums

сті справжніх геосимулякрів: первинного об'єкту, що народив топонім, давно немає, а «індустріальна» назва місцевості чи якогось розташованого на ній об'єкту продовжує існувати, навертаючи минуле у сьогодення. Так, в селі Орловець (Черкащина) назву крайньої північної вулиці «проштамповано» цукроварнею Симиренка як *Заводище*. Неподалік на міжміській автотрасі – офіційна зупинка автобуса «Заводище». Заводу давно немає, він згорів у 1907 році. А заводище є досі. В селі Бучак (Канівщина), де звели першу українську цукроварню, «Заводищем» кличуть цілком природний – чималий горб та його підніжжя. Тут до середини XX ст. розміщувалося декілька діючих невеликих підприємств, серед яких можна було ще побачити залишки давньої цукроварні[3]. Зараз місцевість «Заводище» – глибоко демутований індустріально-ландшафтний слід, знайти виробничу старовину тут можна лише вдаючись до ретельних пошуків археологічного спрямування [11, 14]. З непохованих речей від колишньої робітної слави бучацького Заводища залишився тільки старезний вітряк – пам'ятка техніки.

Сліди склярства у Закарпатті. Сьогодні скловаріння на Закарпатті немає, але раніше воно тут існувало. До впровадження в гутництво сучасних пірогенних технологій з використанням вугілля і газу, виробництво скла функціонувало із застосуванням деревини і деревного вугілля, яких потрібно було дуже багато. Тому гути концентрувалися в лісистих районах. Букові ліси Закарпаття були особливо цінними для виготовлення скла, оскільки зола буку містила велику кількість SiO_2, що при варінні скломаси було дуже корисним. Це обумовило певне розповсюдження гутництва у Закарпатті, хоча місця склоробства були важко доступними. Зазвичай населені пункти, в яких робилося скло, кликали *гутами*. Це давній виробничий український топонім. У досліджених нами гутних селах –Гуті Полянській та Гуті Родниковій скло почали виготовляти приблизно 400 років тому. Припинила свою роботу скловарня в Родниковій Гуті в 1830-х рр., а в Полянській Гуті – в 1930-х рр.

Ландшафтні сліди гутництва в Гуті Родниковій утворилися переважно через демутацію, в Гуті Полянській – у зв'язку зі зміною соціальної функції місця: сьогодні у межах колишнього проммайданчика – селитебна забудова. В обох селах найхарактернішим слідом, залишеним промландшафтами колишнього склярства, є *безлісисть* верхівок і схилів навколишніх гірських хребтів: це – результат багаторічного використання букової деревини у скловарінні. Технологи гутництва, а це очевидно *скляний матеріал*, в певній кількості вдалося віднайти лише в Гуті Родниковій, на невеликому «п'ятачку» при в'їзді в село. Вони не рясні, але залягають з поверхні. В Гуті Полянській склобій ідентифікується поодиноко в оголенні правого берега невеликої, але прудкої, річки Звір. Натомість у пам'яті селян склозаводські технологи закарбувалися гарно. Практично всі мешканці, яких я розпитував про давню гуту, вказували, що бій скала і цегли дуже рясно зустрічався в селі під час його забудови, при ритті траншей під фундаменти та ям під льохи.

Зі слідів у рельєфі треба вказати на видовжений насип/виїмку, по якому до 1960-х рр. у

[3] Про топонім «Заводище» у селі Бучак і про місце, до якого він відноситься, ми дізналися від мешканців села – подружжя Москаленків, Михайла Миколайовича і Лідії Петрівни.

Гуту Полянську йшла вузькоколійка. Це типова залізнична форма рельєфу, на під'їзді до села і подекуди в самому селі вона ідентифікується гарно.

Найцікавіші сліди гутництва в обох селах – люди. Робочий склад Родникової Гути формувався переважно з автохтонного населення, яким були такі українські субетноси як *верховинці* і *підкарпатські русини*. Завод був досить далеко, як на той час, у горах і міграція робочої з більш «цивілізованих» місць Австро-Угорщини була утрудненою. Найрозповсюдженішим прізвищем серед селян Гути Родникової є *Гутник*. Воно каже саме за себе. Під час польових досліджень у 2008 році мені неймовірно повезло – я натрапив і поспілкувався з сім'єю справжніх підкарпатських русинів – Гутниками Михайлом Петровичем і Марією Йосипівною. Взнати в них русинів було не важко: такого своєрідного діалекту української мови, як у підкарпатських русинів, мабуть більше у жодного субетносу України немає. Я мав задоволення декілька годин насолоджуватися цим неординарним діалектом. Проте це було не так просто: ледь не половину мовлення я не розумів, доводилося гальмувати потік підкарпатсько-русинського дискурсу і просити роз'яснень.

В Полянській Гуті антропологічні особливості індустріально-ландшафтного сліду не менш оригінальні, але зовсім інші. Тут була залізниця, доступ до австро-угорської «цивілізації» був набагато кращим, а тому етнічний склад робітного люду формувався як автохтонним населенням, так і пришлим – *німцями*, *угорцями*, *словаками*, *поляками*, *євреями*. В результаті, як нам пояснили працівниці сільської бібліотеки Марія Василівна Чомоляк і Марія Іванівна Кривка, в Полянській Гуті сформувався «прізвищний інтернаціонал»: найрозповсюдженішими прізвищами тут є Штулер (нім.), Брезинські (пол.), Сегеді, Кошут (угор.), Чомоляк (слов.), Ба́лон (євр.), плюс, звичайно, прізвища автохтонного українського люду. Таким є замисловатий ідеальний слід скловаріння в цьому закарпатському селі.

Початок українського урано-добування. В 1945-1947 роках в СРСР склалася дуже напружена ситуація з видобуванням уранової руди, яка була конче необхідна для виготовлення Радянським Союзом атомної бомби. Урану просто не вистачало. В 1945-1946 рр. Радянський Союз міг розраховувати на відомі уранові родовища, що експлуатувалися, – Табошар (Таджикістан), Туя-Муюн (Киргизія), Сілламяе (Естонія). Частину уранової руди завезли з Германії, Чехії, Болгарії, але сировини все рівно не вистачало – для того, щоби завантажити реактор А-1 і виготовити необхідну для ядерного заряду кількість ^{239}Pu (перша радянська атомна бомба була плутонієвою). Ситуація кардинально змінилася, коли в 1945 році відкрили Першотравневе родовище залізо-уранових руд – біля селища Веселі Терни, на північ від Кривого Рогу («Первомайка»); а рік поспіль – Жовторіченське родовище біля селища Жовта Річка (нині місто Жовти Води). Першими урановими шахтами України були копальні *2/6*, *Д* і *4-біс* на околицях Веселих Тернів. Їх вирили ще в 1930-х роках як залізорудні, але урановими, точніше, залізо-урановими, почали вважати лише в 1945 році, коли стало ясно що поклади уранової сировини мають тут промислові масштаби. Першою копальнею, на котрій запаси урану визначили як промислові, була шахта «4-біс».

Очевидно, місця, пов'язані з першими українськими урановими копальнями, слід віднести до меморіальних, вважати їх пам'ятками науки і техніки – об'єктами індустріальної спадщини України. Завдяки роботі уранових шахт Криворіжжя, в 1947-1948 роках було отримано таку кількість уранової сировини, що її вистачило для виготовлення першої радянської атомної бомби, а ця подія мала не аби яке історичне значення, можна сказати навіть – всесвітньо-історичного масштабу (був даний старт Холодній війні). В 1950-х рр. на Першотравневому руднику було закладено ще 2 великі уранові копальні – «Об'єднана» і «Північна Вентиляційна». В сумі 5 шахт утворили потужний промисловий вузол урано-добування. Сьогодні стан колишніх криворізьких уранових копалень «Первомайки» є різним. Шахти «2/6», «Об'єднана» і «Північна Вентиляційна» представлені руїнними пост-техногенними ландшафтами, які не важко віднайти на місцевості. Від «Об'єднаної» збереглося навіть два майже неушкоджених будинки [13]. А от від копалень «Д» і «4-біс» залишилися лише індустріальні сліди, які ідентифікувати вдалося з трудом. Неоціненну поміч в цьому нам надали ветерани українського урано-добування – Пензін Олексій Андрійович (м. Кривий Ріг) і Яковлєв Віктор Михайлович (м. Жовті Води). Спираючись на їхні спогади, картографічні і фотоматеріали з особистих архівів, а також залучаючи картографічні матеріали 1950-х років з робіт акад. Я.М. Бєлєвцева [2, 3] і сучасні космознімки з Мережі, нам вдалося з високим ступенем вірогідності ідентифікувати місця колишнього розташування шахт «Д» і «4-біс». Виявилося, що від промислового майданчику шахти «Д» залишилася лише вузенька смужка самої північної її частини. На ній ще можна знайти деякі артефакти шахтного устаткування, але загалом колишній пост-техногенний ландшафт, знаходиться в дуже глибокій стадії демутації (рис. 4). Вся інша тери-



Рис. 4. Зверху: сучасний вигляд колишнього уранодобувного вузла «Первомайка» (вдалині деякі зі споруд є залишками копальні «Об'єднана»). Внизу – артефакти, що залишилися від шахти «Д» – обривки тросу (зліва), цегляний фрагмент будівлі (центр), бетонний залишок виробничої споруди (праворуч). Квітень 2024 р., м. Кривий Ріг, селище Веселі Терни / Fig. 4. Above: a modern view of the former «Pervomayka» uranium mining site (in the distance, some of the buildings are the remains of a mine «United»). Below – artifacts left from the «D» mine – fragments of a cable (left), a brick fragment of a building (center), concrete remains of a production facility (right). April 2024, the city of Kryvyi Rih, the village of Veseli Terny

торія промислового майданчика копальні «Д» просто «з'їдена» Першотравневим кар'єром Північного гірничо-збагачувального комбінату. Щодо копальні «4-біс», то аутентичним її об'єктом є лише один – старий залізничний насип під'їзного шляху з майже зогнилими шпалами. Всі інші аутентичні артефакти, пов'язані з копальнею «4-біс», зникли під промисловою та транспортною забудовою автотранспортного цеху і дробарної фабрики №2 ПівнГЗК, або поховані під рекультивованими відвалами Першотравневого залізорудного кар'єру. Між проммайданчиками копалень «Об'єднаної» і «Д» колись проходила вулиця гірничого селища урано-добувників *Бейкуш* (частина Веселих Тернів). Сліди цієї вулиці також непогано ідентифікуються на місцевості: кам'янисті залишки будинків і утворений ними антропогенний горбисто-ямковий рельєф, зотлілі паркани садиб, своєрідні здичавілі культур-фітоценози, складені плодово-ягідними, рудеральними і природно-зональними деревами й чагарниками.

Висновок. Культурно-історична спадщина має у своєму складі такі своєрідні об'єкти, як ландшафтні сліди. Якщо це виробнича й науково-технічна спадщина, то слід говорити про ландшафтно-індустріальні сліди (індустріально-ландшафтні сліди, індустріальні сліди у ландшафті). Вони акумулюють і пошарово «накопичують» у пост-техногенному ландшафті найрізноманітніші артефакти та образи, котрі є свідоцтвами про форми минулої виробничої активності й побутування трударів, інженерно-технологічної думки технічної інтелігенції. В індустріально-ландшафтних слідах різними ідеальними способами – легенди, мова, прізвища, топоніміка, музика тощо – концентруються і консервуються також елементи нематеріальної спадщини місця побутування і праці робітного люду. Індустріальні сліди, накопичені пошарово у ландшафті, надають останньому ознак палімпсесту і переводять його у розряд ландшафту культурного (зокрема меморіального). Ландшафтні сліди й палімпсести потребують охорони та збереження, причому способами доволі специфічними, схожими на такі, що застосовуються до пам'яток археології. Одним з основних напрямків збереження меморіальної виробничої території, індустріально-ландшафтного сліду та палімпсесту є реваloризація колишнього промислового об'єкту і утворюваного ним посттехногенного ландшафту. Індустріальні сліди і палімпсести є дуже вразливими об'єктами для пам'яткоохоронства. На них звертають увагу в останню чергу, якщо взагалі звертають, і відносяться до них, скоріше, як до докучливих акультурних ландшафтів, аніж як до надбання культури – пам'яток науки і техніки. Наведені в статті приклади свідчать про те, якими різнобічними, важливими і тонкими можуть бути індустріально-ландшафтні сліди і палімпсести в системі культурно-історичної спадщини. Методи і методологія їх збереження мають свої особливості і вирізняються надвисоким ступенем комплексності, яка може бути повноцінно реалізованою лише при ландшафтному підході.

Список використаних джерел

1. *Алегрія, С. (1976). Світ великий, та чужий / пер. з ісп. К.: Вид. худ. літ. «Дніпро».*
2. *Белевцев, Я. Н. (1955). Железные руды Криворожского железорудного басейна. К.: Наукова думка.*
3. *Белевцев Я.Н. (1951). Криворожский железорудный бассейн: Т. 1. Геологическое строение. М.: Госгеоиздат..*
4. *Водзинський, Є.Є. (2010). Охорона ландшафтів як складова збереження культурної спадщиною. Праці Науково-дослідного інституту пам'яткоохоронних досліджень, 5, 301-317.*
5. *Дьомін, О., Тютюнник, Ю., Сорокіна, Л. (2023). Історичні ландшафти перших цукроварень Поділля. Фізична географія і геоморфологія, 46 (1-6), 7-17. DOI: https://doi.org/10.17721/phgg.2023.1-6.01*
6. *Звіряка, А. (2010). Культурний ландшафт у формуванні території м. Києва. Регіональна історія України, 4, 227-236.*
7. *Ливингстон, Д. (1955). Путешествия и исследования в Южной Африке с 1840 по 1855 гг. Пер. с англ. М.: Гос. изд. геогр. лит.*
8. *Основи пам'яткознавства. (2012). К.: Центр пам'яткознавства НАН України і Українського товариства охорони пам'яток історії і культури.*
9. *Пакульскій, Н.А. (1901). Изъ области свеклосахарной промышленности в Черниговской губерніи. К.: Типографія Г.Л. Францкевича.*
10. *Романчук, С.П. (1998). Історичне ландшафтознавство: Теоретико-методологічні засади та методика антропогенно-ландшафтних реконструкцій давнього природокористування. К.: РВЦ «Київський університет».*
11. *Тютюнник, Ю.Г. (2021). Виробничий ландшафт і його демутація. К.: Інститут еволюційної екології національної академії наук України.*
12. *Тютюнник, Ю.Г. Цукроварні України. Індустріальна спадщина і ландшафт. (2016). К.: ІЕЕ НАНУ.*
13. *Тютюнник, Ю.; Писаревська, Н.; Ярков, С. (2024). Історичні ландшафти української уранової промисловості Фізична географія і геоморфологія, 47(1-2), 40-52. DOI: https://doi.org/10.17721/phgg.2024.1-2.05*
14. *Тютюнник, Ю.Г.; Шабатура, О.В. (2016). Індустріоземи та їх використання в археологічному ґрунтознавстві. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Сер. ГЕОЛОГІЯ, 2(73), 53-57.*

15. Alba Dorado, M.I.; Oliveira, de, E.R. (2022). El paisaje industrial. Aproximación al diseño de unas bases metodológicas para su estudio, puesta en valor e intervención. ACE: Architecture, City and Environment, 16(48), 1-28. DOI: http://dx.doi.org/10.5821/ace.16.48.10501
16. Anschuetz, K.F.; Wilshusen, R.H.; Scheick C.L. (2001). An Archaeology of Landscapes: Perspectives and Directions. Journal of Archaeological Research, 9 (2), 157-212.
17. Catalán, R.H.; Fernández, R.F. (2012). Farmacopea sagrada: proceso, rito y horizonte de la Ayahuasca. Patrimonio inmaterial e intangible de la industria: artefactos, objetos, saberes y memoria de la industria. Gijón: INCUNA, 563-570.
18. Flórez, A.V.; Crespo, J.V.; Fernández, F.F.; Rodríguez J.M.; González D.V. (2025). Tren gastronómico a los 5 sentidos: tu viaje desde lo propio en el Ecomuseo Minero Valle de Samuño. Los ojos de la memoria, patrimonio y arqueología industrial: Colección, 32, 73-74.
19. Juaristi J. (2007). El paisaje industrial entre el patrimonio histórico y la tecnología. Fabrikart, 7, 96-113;
20. Simal J.S. (2015). Los paisajes históricos de la producción en Cuba. Conservación de centros históricos en Cuba: Colección, 1, 225-246. DOI: https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3606.4161

Landscape traces and palimpsests in industrial cultural and historical heritage

Yulian Tyutyunnyk
DSc (Geography), Professor, Senior Researcher,
State Polytechnic Museum named after Boris Paton
at NTUU "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
Kyiv, Ukraine

ABSTRACT

The article examines theoretical and applied issues of the landscape science approach to the study and preservation of industrial cultural and historical heritage.

Purpose. To justify and illustrate with specific examples the provisions about industrial traces and palimpsests in relation to post-technogenic landscapes, as well as to show the possibilities of applying the developed concept in the practice of research and preservation of industrial heritage.

Methods. 1. Comparative-historical, paleolandscape studies. 2. Industrial-archaeological. 3. Historical-hermeneutic. 4. Remote (using Internet resources). 5. Sociological-field.

Results. Landscape traces are newly formed and transformed elements, components and images of the landscape (in the landscape), which were caused by human activity, which actually stopped or was greatly reduced. Traces accumulated layer by layer in the landscape form a landscape palimpsest (landscape as a palimpsest). Landscape traces and palimpsests are important for the landscape to acquire cultural qualities. They are the subject of protection and preservation, objects of cultural and historical heritage. If the human activity that creates traces and palimpsests is a production activity and causes the formation of a post-technogenic landscape, then we should talk about industrial landscape traces and palimpsests. They are objects of industrial heritage and are also subject to protection and preservation. The simplest monument protection category that can be applied to them is "monument of science and technology" (this concept is regulated by law). Industrial traces and palimpsests consist of material and ideal objects and phenomena related to production activities and the daily life of working people, prominent figures of scientists, engineers, and technologists. The ideal component of the industrial footprint in the industrial post-technogenic landscape is represented by workers' slang, folklore, music, legends, superstitions, traditions, toponyms, surnames, etc. The article presents experience and outlines problems related to the identification, study, and preservation of industrial traces and palimpsests in post-technogenic landscapes that were formed by sugar beet production (Vinnytsia, Zhytomyr, Kyiv, Cherkasy, Chernihiv regions), glassmaking (Transcarpathia), uranium mining (Kryvbas). All of them are the industrial heritage of our Motherland and require accounting, research, and protection.

Scientific novelty. Theoretical developments in the field related to the doctrine of landscape traces and palimpsests in general and regarding industrial post-technogenic geosystems in particular are brought into a coherent system. Unique examples of landscape traces and palimpsests in the sugar factory, glass-making and uranium-mining heritage of Ukraine are presented.

Practical significance. The developments of the article can be effectively used in the identification, study and protection of industrial cultural and historical heritage.

Keywords*: industrial landscape footprint; post-technogenic landscape, landscape palimpsest; sugar factory, glass-making, uranium-mining heritage of Ukraine.*

References

1. Alegría, C. (1976). Mundo ancho y ajeno. Traducción del español. Kyiv: Ed. Dnípro [in Ukrainian]
2. Belevtsev, Ya. N. (1955). Iron ores of the iron ore basin of Kryvyi Rig. Kyiv: Scientific Idea.
3. Belevtsev, Ya.N. (1951). Iron ore basin of Kryvyi Rig. Vol. 1. Geological structure. M.: Ed. Gosgeoizdat.

4. Vodzinskyi, E.E. (2010). Landscape protection as a component of cultural heritage preservation. Proceedings of the Scientific Research Institute for Monument Preservation Studies, 5, 301-317. [in Ukrainian]
5. Dyomin, O.; Tyutyunnyk, Yu.; Sorokina, L. (2023). Historical landscapes of the first sugar mills of Podillia. Physical geography and geomorphology, 46 (1-6), 7-17. DOI: https://doi.org/10.17721/phgg.2023.1-6.01 [in Ukrainian]
6. Zviryaka, A. (2010). Cultural landscape in the formation of the territory of the city of Kyiv. Regional history of Ukraine, 4, 227-236. [in Ukrainian]
7. Livingstone, D. (1955). Travels and studies in South Africa from 1840 to 1855 / translation from English. M.: State publishing house of geographic literature.
8. The basics of monument studies. (2012). K.: Center for Monument Studies of the National Academy of Sciences of Ukraine and the Ukrainian Society for the Protection of Historical and Cultural Monuments. [in Ukrainian]
9. Pakul'skyi, N.A. (1901). From the region of beet sugar industry in Chernihiv province. Kyiv: Typography G.L. Franzkevich.
10. Romanchuk, S.P. (1998). Historical landscape science: Theoretical and methodological foundations and methods of anthropogenic landscape reconstructions of ancient nature use. Kyiv: Editorial and Publishing Center "Kyiv University". [in Ukrainian]
11. Tyutyunnyk, Yu.G. (2021). The production landscape and its demutation. K.: Institute of Evolutionary Ecology of the National Academy of Sciences of Ukraine. [in Ukrainian]
12. Tyutyunnyk, Yu.G. (2016). Sugar factories of Ukraine. Industrial heritage and landscape. K.: Institute of Evolutionary Ecology of the National Academy of Sciences of Ukraine [in Ukrainian]
13. Tyutyunnyk, Yu.; Pisarevska, N.; Yarkov, S. (2024). Historical landscapes of the Ukrainian uranium industry Physical geography and geomorphology, 47(1-2), 40-52. DOI: https://doi.org/10.17721/phgg.2024.1-2.05 [in Ukrainian]
14. Tyutyunnyk, Yu.G.; Shabatura, O.V. (2016). Industrial soils and their use in archaeological soil science. Bulletin of Taras Shevchenko Kyiv National University. Ser. GEOLOGY, 2(73), 53-57. [in Ukrainian]
15. Alba Dorado, M.I.; Oliveira, de, E.R. (2022). El paisaje industrial. Aproximación al diseño de unas bases metodológicas para su estudio, puesta en valor e intervención. ACE: Architecture, City and Environment, 16(48), 1-28. DOI: http://dx.doi.org/10.5821/ace.16.48.10501
16. Anschuetz, K.F.; Wilshusen, R.H.; Scheick C.L. (2001). An Archaeology of Landscapes: Perspectives and Directions. Journal of Archaeological Research, 9 (2), 157-212.
17. Catalán, R.H.; Fernández, R.F. (2012). Farmacopea sagrada: proceso, rito y horizonte de la Ayahuasca. Patrimonio inmaterial e intangible de la industria: artefactos, objetos, saberes y memoria de la industria. Gijón: INCUNA, 563-570.
18. Flórez, A.V.; Crespo, J.V.; Fernández, F.F.; Rodríguez J.M.; González D.V. (2025). Tren gastronómico a los 5 sentidos: tu viaje desde lo propio en el Ecomuseo Minero Valle de Samuño. Los ojos de la memoria, patrimonio y arqueología industrial: Colección, 32, 73-74.
19. Juaristi J. (2007). El paisaje industrial entre el patrimonio histórico y la tecnología. Fabrikart, 7, 96-113.
20. Simal J.S. (2015). Los paisajes históricos de la producción en Cuba. Conservación de centros históricos en Cuba: Colección, 1, 225-246. DOI: https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3606.4161

Received 5 June 2025
Accepted 18 September 2025

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-33
УДК 528.8:614.84(477.81+477.42)
Надійшла 2 червня 2025 р.
Прийнята 25 липня 2025 р.

Методика та практична реалізація оцінки масштабів і наслідків пожеж в межах об'єктів Смарагдової мережі Волинського та Житомирського Полісся методами ДЗЗ

Василь Фесюк [1]
д. геогр. н., професор, кафедра фізичної географії,
[1] Волинський національний університет ім. Лесі Українки, Луцьк, Україна,
e-mail: fesyuk@ukr.net, https://orcid.org/0000-0003-3954-9917;
Микола Федонюк [2]
к. геогр. н., доцент, кафедра екології,
[2] Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна,
e-mail: m.fedoniuk@lntu.edu.ua, https://orcid.org/0000-0002-4034-3695;
Ірина Мороз [2]
к. хім. н., доцент, кафедра харчових технологій та хімії,
e-mail: moroz.iryna1@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-9167-4876;
Віталіна Федонюк [2]
к. геогр. н., доцент, кафедра екології,
e-mail: v.fedoniuk@lutsk-ntu.com.ua, https://orcid.org/0000-0002-1880-6710

Зміни клімату, антропогенне навантаження, природні пожежі є ключовими загрозами для екосистем, в т.ч., унікальних природоохоронних територій. Об'єкти Смарагдової мережі Волинського та Житомирського Полісся мають важливе значення для збереження біорізноманіття на національному та європейському рівнях, але в той же ж час зазнають негативних наслідків пожеж. Метою статті є розробка та апробація методики оцінки масштабів і наслідків пожеж в межах об'єктів Смарагдової мережі Волинського та Житомирського Полісся з використанням даних ДЗЗ, з урахуванням особливостей природних умов регіону та специфіки природоохоронного статусу територій. Об'єктом дослідження є природні комплекси територій Смарагдової мережі Волинського та Житомирського Полісся, які зазнають впливу пожеж. Предметом дослідження є закономірності поширення та просторового розподілу пожеж в межах об'єктів Смарагдової мережі Волинського та Житомирського Полісся. Для отримання вихідних даних використано сервіс European Forest Fire Information System (EFFIS). Звідти завантажено масив даних про термальні аномалії, зафіксовані супутниками MODIS Aqua і MODIS Terra протягом 2012-24 рр. Здійснено вибірку даних для території Волинської, Рівненської та Житомирської областей України. Розраховано основні статистичні показники виникнення пожеж за цей період. Створено відповідний векторний шар даних у QGIS. Розраховано щільність термоточок за комірками регулярної сітки. Створено шар контурів об'єктів Смарагдової мережі на території області інтересу за даними порталу Emerald Network by European Environment Agency. Обчислено кількість термоточок у межах кожної з територій Смарагдової мережі. Встановлено, що найчастіше уражались пожежами лучні екосистеми. Це свідчить про їх невисоку стійкість та необхідність дотримання правил запобігання виникненню пожеж. Не дивлячись на різну структуру та статус охорони, території мережі Emerald забезпечують кращу збереженість біотопів від загроз пожеж. Запропоновано інтегрований підхід до виявлення осередків пожеж, оцінки уражених територій та класифікації ступеня впливу на природні екосистеми, зокрема, на охоронювані оселища та види. Запропонована методика дозволяє оптимізувати використання супутникових даних для оцінки ризиків та відновлення порушених екосистем.

***Ключові слова**: пожежі в екосистемах, масштаби і наслідки пожеж, осередки горіння, термоточки, термальні аномалії; щільність пожеж, частота пожеж, території Смарагдової мережі.*

Як цитувати: Фесюк Василь, Федонюк Микола, Мороз Ірина, Федонюк Віталіна (2025). Методика та практична реалізація оцінки масштабів і наслідків пожеж в межах об'єктів Смарагдової мережі Волинського та Житомирського Полісся методами ДЗЗ. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*, (63), 451-467. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-33

In cites: Fesyuk Vasyl, Fedonyuk Mykola, Moroz Iryna, Fedonyuk Vitalina (2025). Methodology and practical implementation of assessing the scale and consequences of fires within the Emerald network of Volyn and Zhytomyr Polissya using remote sensing. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 451-467. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-33 [in Ukrainian]

Постановка проблеми. У сучасних умовах зміни клімату та зростання антропогенного навантаження природні пожежі стають однією з ключових загроз для екосистем, зокрема, унікальних природоохоронних територій. Об'єкти Смарагдової мережі Волинського та Житомирського Полісся, які мають важливе значення для збереження біорізноманіття на національному та європейському рівнях, теж зазнають значних негативних наслідків пожеж. Водночас, існує необхідність поліпшення доступу до актуальної, просторово точної та систематизованої інформації про масштаби і наслідки цих пожеж. Традиційні методи моніторингу виявляються недостатньо ефективними для оперативної оцінки таких явищ на великих площах. Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) є перспективним інструментом комплексного аналізу динаміки пожеж і їх

© Фесюк Василь, Федонюк Микола, Мороз Ірина, Федонюк Віталіна, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

впливу на природні комплекси.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Пожежі в екосистемах давно є об'єктом численних наукових досліджень. Значна їх частина присвячена вивченню чинників розвитку і поширення лісових пожеж, а також кореляції ризику і частоти виникнення пожеж із кліматичними умовами та глобальними змінами. Починаючи з 90-х рр. минулого століття вплив кліматичних змін на виникнення пожеж активно обговорювався [29, 10], хоч оцінки не були однозначними. Так, наприклад, у роботі [9] наведені прогнози, згідно яких у багатьох районах Північної півкулі кількість пожеж в екосистемах повинна знизитись, навіть при зростанні температури повітря. З часом такі прогнози були переглянуті й самими авторами [23]. Деякі пізніші дослідження кліматичних умов, зокрема, [12], показували зростання тривалості пожежонебезпечного періоду у більшості регіонів світу. Але при цьому, наприклад, територія Заходу України відносилась до районів із зменшенням пожежної небезпеки [12]. Після проаналізованого періоду ця територія вже зазнала кілька хвиль екстремальних пожеж (2015 р., 2020 р.), яких раніше не бувало.

На сьогодні у переважної більшості дослідників вже існує консенсус щодо однозначно суттєвого впливу глобальної зміни клімату на збільшення тривалості пожежонебезпечних періодів, частоти пожеж та їх наслідків. При цьому, як слушно зазначається у роботі [21], власне потепління не є безпосередньою причиною пожеж, але воно сприяє зниженню (та частішому перетинанню) порогів інших трьох основних чинників – запалювання (ignition), запасу палива (fuel load) та посухи (drought), а також швидшому поширенню пожеж на більші площі. При цьому важливо враховувати не тільки прямі чинники, але й опосередковані, такі як поведінка людини, зміна типу землекористування, відмирання рослин від посухи і т.п.

Територія України є регіоном із одним з найшвидших темпів прояву глобального потепління і, відповідно, з підвищеним ризиком розвитку пожеж в екосистемах [15, 3, 2].

Пожежі в екосистемах Українського Полісся досліджуються кількома колективами авторів, в тому числі з активним використанням дистанційних методів. Більшість таких досліджень виконувались у розрізі окремих областей.

Частоту і щільність пожеж у Волинській області оцінено у роботі [14]. Детально проаналізовано виникнення пожеж на торфовищах Волинської області протягом 2015-19 рр.у статті [6].

У праці [30] проаналізовано пожежі в Рівненській області протягом 2001-18 рр. за даними MODIS, встановлено сезонну динаміку (за кількістю – максимуми у серпні, за площею – у березні), виділено роки найбільших пожеж (2002, 2012, 2015) та найбільш уражені райони (Рокитнівський, Дубровицький). У матеріалах [22, 32] досліджено виникнення та розвиток пожеж в межах ділянок Рівненського природного заповідника. У роботі [28] на матеріалах Рівненської та Київської областей оцінено кількість горючих матеріалів у соснових лісах Українського Полісся.

Пожежі на Житомирському Поліссі вивчались у багатьох працях науковців Національного університету біоресурсів та природокористування (О. Зібцев, О. Сошенський, В. Гуменюк), Малинського лісового коледжу (В. Левченко, А. Романюк, М. Ткаченко). Це, зокрема, роботи [11, 19, 26, 30-32]. В них оцінено рівні пожежної небезпеки, рівні запасів горючої сировини в основних типах лісів, постпірогенне відновлення окремих ділянок, проведено пірологічний моніторинг в окремих частинах Поліського заповідника та Овруцького лісництва.

Одним з важливих наслідків попередніх досліджень є створення геопорталу «Ландшафтні пожежі в Україні» (https://wildfires.org.ua), який інтегрує в єдиний комплекс багато геопросторових даних щодо пожеж в екосистемах, отриманих з різних джерел [20].

Також останніми роками з'явилось кілька узагальнюючих досліджень, що аналізують пожежі в екосистемах для всієї території Українського Полісся [2] чи України в цілому [16, 26, 27, 31].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Разом з цим, саме пожежі в природно-заповідних об'єктах поки що досліджені мало і фрагментарно. Крім того, найбільша увага приділялась лісовим пожежам. В той же ж час майже половина об'єктів Смарагдової мережі у Поліському регіоні представлені річковими заплавами із переважно лучними та болотними екосистемами, які теж потребують посиленої уваги. Дослідження саме територій Смарагдової мережі дозволить порівняти особливості виникнення пожеж у місцях із різним охоронним статусом, різним типом земельного покриву та землекористування тощо. Окремі аспекти дослідження опубліковані у матеріалах конференції «Моніторинг-2025» [5]. В даній роботі виконана спроба «звести» до єдиного знаменника різні за способами оцінки ураженості пожежами та тенденції їх зміни для територій Смарагдової мережі Волинського та Житомирського Полісся. Актуальність дослідження підвищується у зв'язку із трансформацією довкілля внаслідок розвитку промисловості, сільського господарства, транспорту та інфраструктури, глобальних змін клімату, необхідності адаптації природоохоронного законодавства та практики України до вимог ЄС.

Метою дослідження є розробка та апробація методики оцінки масштабів і наслідків пожеж в межах об'єктів Смарагдової мережі Волинського та Житомирського Полісся з використанням даних ДЗЗ, з урахуванням особливостей природних умов регіону та специфіки природоохоронного статусу територій.

Матеріали та методи. Для отримання вихідних даних використано сервіс European Forest Fire Information System (EFFIS), звідки завантажено масив даних про термальні аномалії, зафіксовані супутниками MODIS Aqua і MODIS Terra за період з лютого 2012 р. по грудень 2024 р. Цей масив містить дані про місце, час, інструменти фіксування термоточок та їх кількісні характеристики (frp – fire radiation power, brightness тощо) [24]. Через низьке просторове розрізнення термального сенсора (1 кмна піксель) практично не фіксуються невеликі загоряння. Крім того, не всі виявлені термоточки відповідають пожежам в екосистемах, але масив можна відфільтрувати за показниками frp та confidence.

Здійснено вибірку даних для території Волинської, Рівненської та Житомирської областей України. За показником confidence відсіяно дані із значенням менше 40% (таких виявилось 13,2%). Розраховано основні статистичні показники виникнення пожеж за цей період. Створено відповідний векторний шар даних у QGIS. Розраховано щільність термоточок за комірками регулярної сітки.

Наступним етапом було формування шару контурів об'єктів Смарагдової мережі на території області інтересу, за даними порталу Emerald Network by European Environment Agency (emerald.eea.europa.eu).

Потім за допомогою інструментів просторового аналізу QGIS обчислено кількість термоточок у межах кожної з територій Смарагдової мережі. Здійснено порівняння об'єктів за отриманими результатами.

Конфігурація найбільших пожеж отримана з датасету EFFIS Burnt areas, алгоритми якого базуються на порівнянні стану рослинності на оптичних та мультиспектральних зображеннях супутників MODIS через визначені проміжки часу. При цьому впевнено виявляються площі горіння більше 30 га, менші – набагато рідше [5]. Отримані полігони обрізані за контурами об'єктів Смарагдової мережі векторними інструментами обробки даних QGIS.

Основні статистичні обчислення проведені інструментами MS Excel.

Просторова класифікація окремих об'єктів виконана за індексом NBR (Normalized Burn Ratio) у сервісах EOSDA LandViewer (за даними Sentinel-2) та GoogleEarthEngine (за даними знімків Sentinel-2 та Landsat-8 при модифікації скрипту BurnSeverityMapping).

Виклад основного матеріалу дослідження. **Результати**.

У європейських та українських наукових публікаціях природоохоронного напрямку значна увага зосереджується на дослідженні компонентів та локацій мережі Емеральд (Смарагдової мережі). Ця мережа формується на території країн-учасниць та держав-спостерігачів Бернської конвенції, до складу яких належать 28 країн-членів ЄС, 19 додаткових європейських держав та 4 африканські країни. Бернська Конвенція щодо збереження дикої флори і фауни та природних середовищ існування в Європі (Convention on the Conservation of European Wildlife and Natural Habitats) була прийнята у 1979 р., вступила в силу 1.06.1982 р. Наша країна долучилася до цієї Конвенції згідно Закону України "Про приєднання до Конвенції 1979 р. про охорону дикої флори і фауни і природних середовищ існування в Європі" від 29.10.1996 р, протягом 1996-98 рр. мала статус спостерігача у роботі Конвенції, а з травня 1999 р. стала повноцінною учасницею.

Ключові цілі Бернської конвенції включають: визначення базового рівня охорони для видів рослин і тварин та їхніх середовищ існування, які перебувають у несприятливому становищі; підсилення їхнього захисту; створення та впровадження заходів для збереження територій поширення видів дикої флори і фауни, особливо тих, що перебувають під ризиком зникнення; підтримка та розвиток міжнародної співпраці у природоохоронній діяльності.

Смарагдова мережа функціонує як механізм для охорони територій з високою екологічною значущістю та створює підґрунтя для кооперації в межах єдиної мережі територій, що охоплює всю Європу. Присутність на конкретній території значної частини популяцій видів та площ оселищ, зазначених у Резолюціях №4 та №6, дає змогу встановити її відповідність критеріям ASCI (Areas of Special Conservation Interest, ASCI). У цьому проявляється принципова відмінність концепції, на якій базуються мережі Емеральд (Смарагдова мережа) та Натура-2000, від звичного підходу до створення природоохоронних територій, прийнятого в Україні. Кожна ASCI виокремлюється на підставі надійних даних про її роль у забезпеченні тривалого збереження визначених Резолюціями №4 та №6 видів і оселищ. Таким чином, до Мережі не може бути залучена будь-яка територія з вже наявним природоохоронним статусом, встановленим національним законодавством, якщо вона не задовольняє критерії, визначені для ASCI.

Станом на березень 2021 р. в Україні налі-

чу-валося 377 територій Смарагдової мережі площею близько 8 млн га. Найбільше їх у Житомирській, Чернігівській, Київській, Івано-Франківській та Закарпатській областях. Характерними особливостями просторового розподілу є: висока щільність територій у північних областях (Полісся), значна репрезентованість гірських територій, менша щільність у степових районах, особлива увага до прикордонних територій. Смарагдова мережа України забезпечує збереження рідкісних та зникаючих видів флори і фауни, підтримання екологічних коридорів для міграції тварин, охорону типових та унікальних природних комплексів, збереження ландшафтного різноманіття.

Законопроект про Смарагдову мережу був підготовлений громадськими організаціями, пройшов необхідні етапи обговорення з експертами та зацікавленими сторонами, але так і не був прийнятий Верховною Радою України. Його чекала доля інших природоохоронних законопроектів, які технічно обґрунтовані та "застрягають" на різних етапах законодавчого процесу через різні політичні пріоритети та недостатність уваги до екологічних питань. У результаті Смарагдова мережа продовжує функціонувати у "правовому вакуумі", спираючись на загальні норми природоохоронного законодавства, що ускладнює її ефективний розвиток.

В той же ж час стан окремих територій продовжує погіршуватись внаслідок антропогенного впливу. Найбільшою мірою впливають на погіршення стану гідротехнічна трансформація, забруднення водних об'єктів, порушення гідрологічного режиму, рекреаційне навантаження, зміна клімату.

Пожежі становлять серйозну загрозу для територій Смарагдової мережі, як і для інших природних оселищ. Лісові пожежі загрожують лісовим масивам мережі, особливо хвойним лісам, які горять інтенсивніше. Торфові пожежі можуть тривати місяцями та завдавати непоправної шкоди унікальним болотним екосистемам чи осушеним торфовищам. Вони можуть привести до загибелі популяцій рідкісних та ендемічних видів рослин і тварин, для яких властиві обмежені ареали поширення та повільні темпи відновлення.

Аналізуючи території Смарагдової мережі в межах Волинського та Житомирського Полісся (рис. 1) слід відмітити, що найбільша площа припадає на них у Житомирській області – 408710,3 га, у Волинській дещо менше – 267021,4 га, у Рівненській ще менше – 183458,1 га. Дещо інша ситуація із розподілом типів оселищ: половина (50%) припадає на Волинську, 27% на Рівненську і лише 23% на Житомирську з найбільшою площею територій Смарагдової мережі. За загальною кількістю біологічних видів також лідирує Волинська область (46%), у Рівненській та Житомирській – по 27%.

У Житомирській області (рис. 2) найбільшими за площею серед територій Смарагдової мережі є Словечанський кряж, Городницький та Долина р. Тетерів. Найбільша різноманітність птахів характерна для Овруцького, Городницького та Поліського, загальна кількість видів та кількість типів оселищ – Овруцького, Західно-Овруцького та Поліського об’єктів.

У Волинській області (рис. 3) найбільшими за площею серед територій Смарагдової мережі є Шацький, Цуманська Пуща та Стохід-Нобель. Найбільша різноманітність птахів характерна для таких об’єктів: Стохід-Нобель, Турійського та Заплава Турії – Прип’ять, загальна кількість видів – Шацького, Прип'ять-Стохід національний природний парк, Стохід-Нобель, кількість типів оселищ – Шацького, Прип'ять-Стохід національний природний парк, Стохід-Нобель та Черемський природний заповідник.

У Рівненській області (рис. 4) найбільшими за площею серед територій Смарагдової мережі є Рівненський природний заповідник, Дубровицький та Дубровицько-Сарнівський. Для них характерна найбільша різноманітність птахів, загальна кількість видів та кількість типів оселищ.

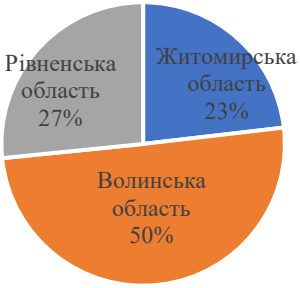
Щоб оцінити ураженість пожежами територій Смарагдової мережі, для початку було визначено відповідні показники в цілому для окреслених трьох адміністративних регіонів, а потім проведено порівняльну оцінку.

Протягом 2012-24 рр. на досліджуваній території зафіксовано понад 30 тис. термальних аномалій, які можна асоціювати з пожежами в екосистемах. Після фільтрування бази даних за показником confidence (більше 40%), це число склало біля 27,5 тис. пожеж. Найбільше пожеж зафіксовано у Житомирській (12 тис.), найменше – у Волинській (менше 6 тис.). По Рівненській області зафіксовано 9,5 тис. пожеж. За щільністю пожеж співвідношення дещо інше, адже територія Житомирської області майже у 1,5 рази більша за територію Волинської чи Рівненської.

Рис. 4 демонструє розподіл щільності пожеж за областями та за роками. Найвищі показники частіше спостерігались у Рівненській області (8 років з 13: 2013-2016 рр., 2018 р., 2019 р., 2021р., 2024 р.). У Волинській області найвища щільність пожеж була у 2012 р. і 2017 р, у Житомирській – у 2020 р., 2022 р. і 2023 р. Загалом по території середньорічна щільність пожеж склала 0,035/км^2, але в різні роки вона коливалась від 0,0032 до 0,124 (3,2-12,4/1000 км^2). Середня



Площа по областях

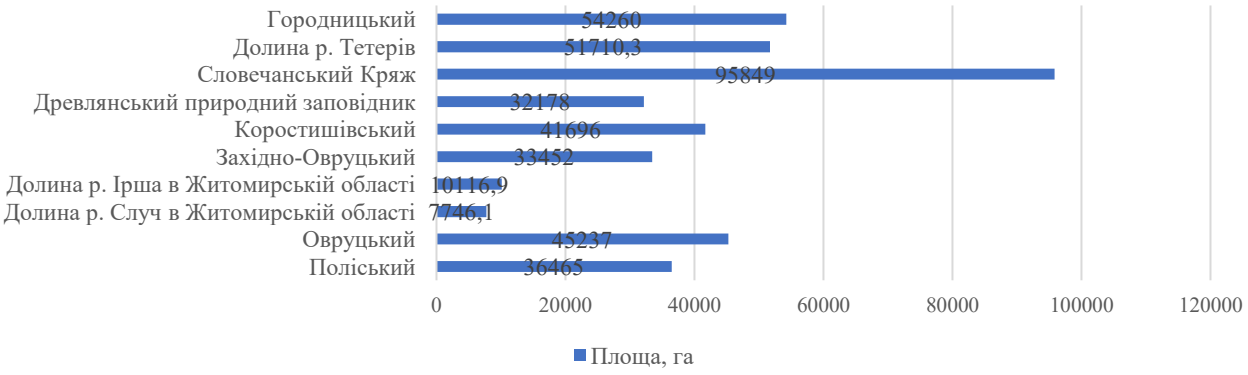


Кількість типів оселищ по областях



Загальна кількість видів по областях

Рис. 1. Характеристика територій Смарагдової мережі Волинського та Житомирського Полісся / Fig. 1. Characteristics of the Emerald Network areas of Volyn and Zhytomyr Polissya



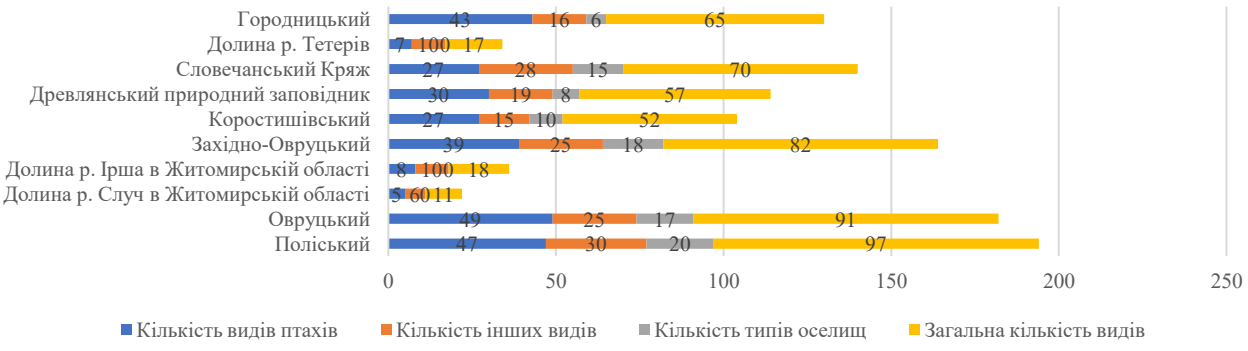


Рис. 2. Площа та характеристика територій Смарагдової мережі Житомирської області / Fig. 2. Area and characteristics of the territories of the Emerald Network in Zhytomyr region

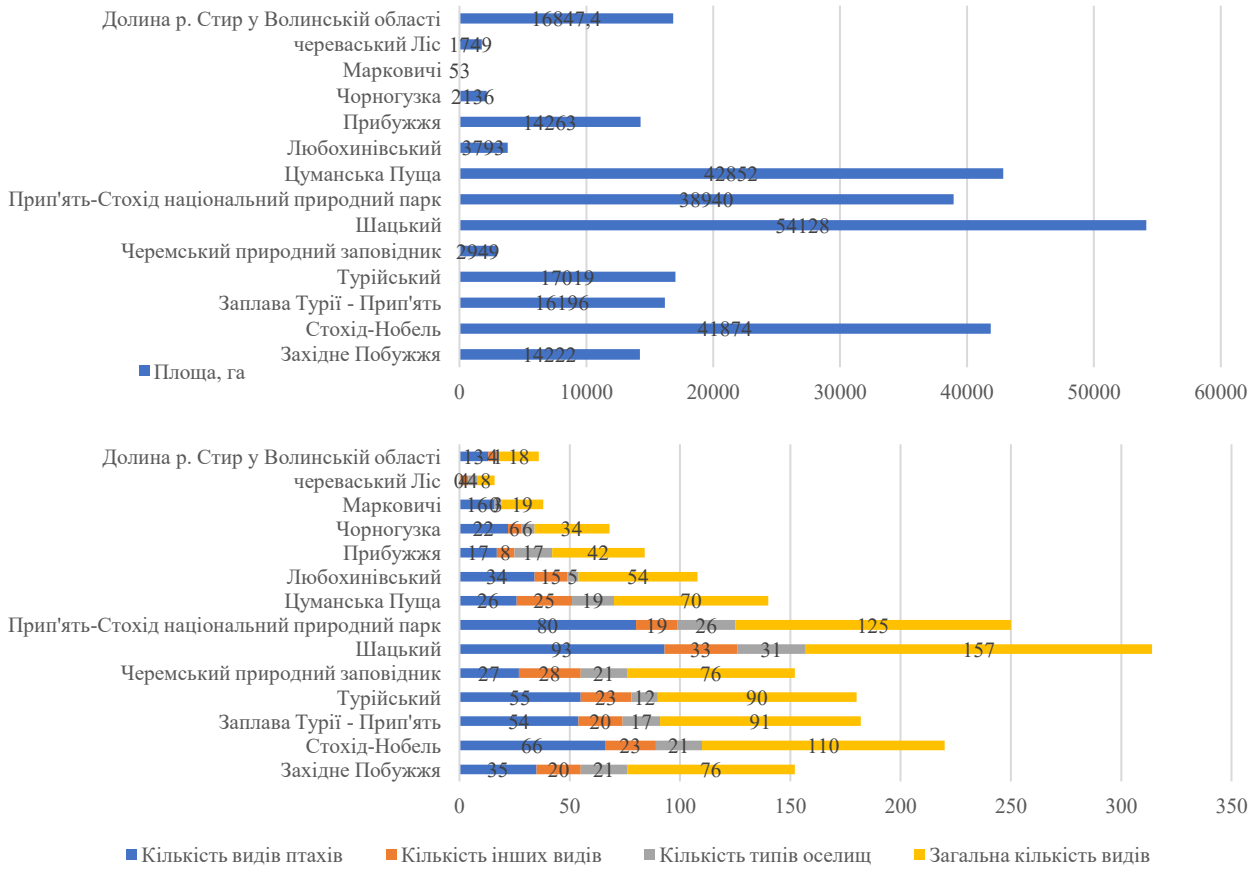


Рис. 3. Площа та характеристика територій Смарагдової мережі Волинської області /
Fig. 3. Area and characteristics of the Emerald Network territories in Volyn region

щільність пожеж за весь досліджуваний період склала 0,4/км^2.

Максимальна кількість пожеж характерна для 2015 р. і 2020 р., мінімальна – 2013 р., 2023 р. і 2024 р. Це добре узгоджуються із відповідними кліматичними умовами (високі температури та тривалий бездощовий період у серпні-вересні 2015 р., критично мала кількість опадів під час зими-початку весни у 2015 р. та 2020 р., сильні весняні повені 2013 р., 2023 р. і 2024 р., які забезпечували достатні запаси вологи у ґрунті на наступні періоди).

Сезонний розподіл кількості пожеж також має виразні піки у березні-квітні (більше 62% від усього числа), а також у серпні-вересні-жовтні (31,3%).

В межах власне територій Смарагдової мережі протягом 2012-24 рр. зафіксовано сумарно біля 2,5 тис. термальних аномалій. Щільність пожеж становила 0,212/км^2. Це майже вдвічі менше середнього показника щільності пожеж для території досліджуваних областей (0,3398 – для Волинської, 0,5484 –Рівненської, 0,4675 – Житомирської). Це видно на картосхемі розрахованого показника щільності пожеж за комірками регулярної сітки (рис. 8).

Дані по кожній окремій території Смарагдової мережі, де виникали пожежі, наведені у табл. 1. Аналіз даних таблиці відображає чітку диференціацію об'єктів Смарагдової мережі за щільністю виникнення пожеж. У межах 11 територій цей показник навіть вищий середнього по регіону (Чорногузка, Познань-Блажове, Рівненський природний заповідник, Нижній Случ, Стохід-Нобель, Заплава Турії – Прип'ять, Долина р. Стир у Волинській області, Прип'ять-Стохід національний природний парк, Древлянський природний заповідник, Овруцький, Дубровицько-Сарнівський). Але детальніший розгляд показує, що навіть у половини з цих об'єктів щільність пожеж все одно менша від щільності на прилягаючих ділянках. Це, зокрема, Дубровицько-Сарнівський, Рівненський природний заповідник, Познань-Блажове, Древлянський природний заповідник (приклади на рис. 9).

Натомість на об'єктах: Чорногузка, Нижній Случ, Стохід-Нобель, Заплава Турії – Прип'ять, Долина р. Стир у Волинській області, Прип'ять-Стохід національний природний парк та Овруцький інтенсивність виникнення пожеж вища або співставна із аналогічною на прилеглих територіях. За винятком Овруцького, у межах усіх цих

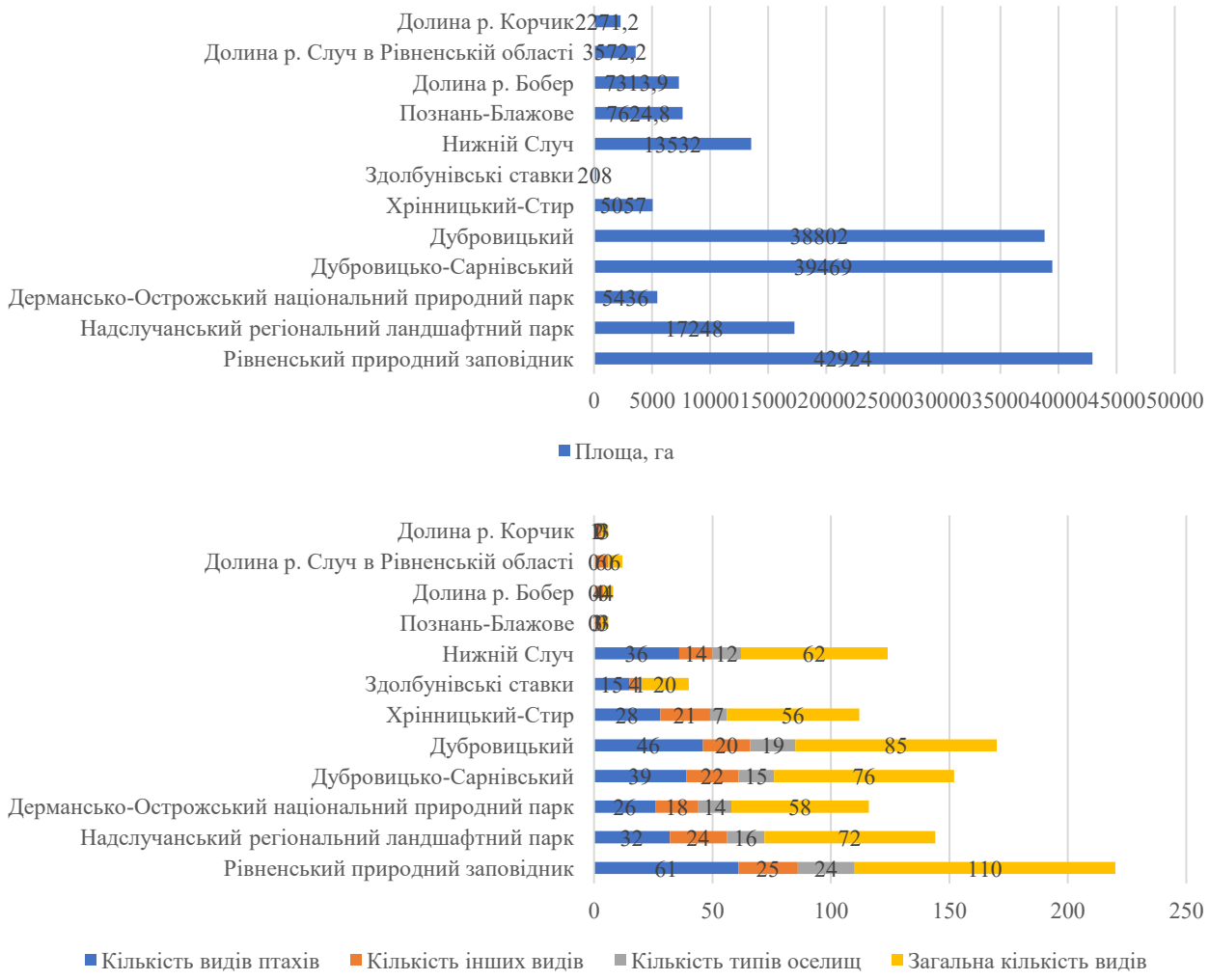


Рис. 4. Площа та характеристика територій Смарагдової мережі Рівненської області /
Fig. 4. Area and characteristics of the Emerald Network territories in Rivne region

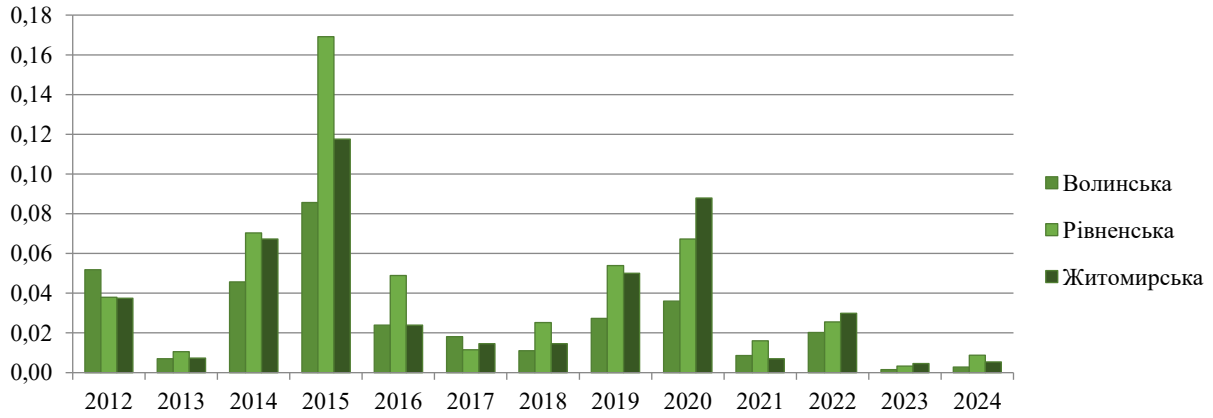


Рис. 5. Щільність виникнення пожеж на км^2 по областях / Fig. 5. Density of fires per km^2 by region

об'єктів серед природних комплексів переважають обширні території заплав річок із очеретяно-лучною рослинністю, яка часто стає об'єктом пожеж, особливо навесні, внаслідок випалювання.

Але більшість (25 із 37) розглянутих територій Смарагдової мережі мають показник щільності пожеж менший від середнього. В межах 14 територій щільність ураження менше 1 пожежі на 1000 га. На 4 територіях (Черемський природний заповідник, Марковичі, Череваський Ліс, Здолбунівські ставки) за 13 років взагалі не зафіксовано жодної термоточки.

Окрім власне щільності пожеж, важливим показником є площа горіння. Для такої оцінки

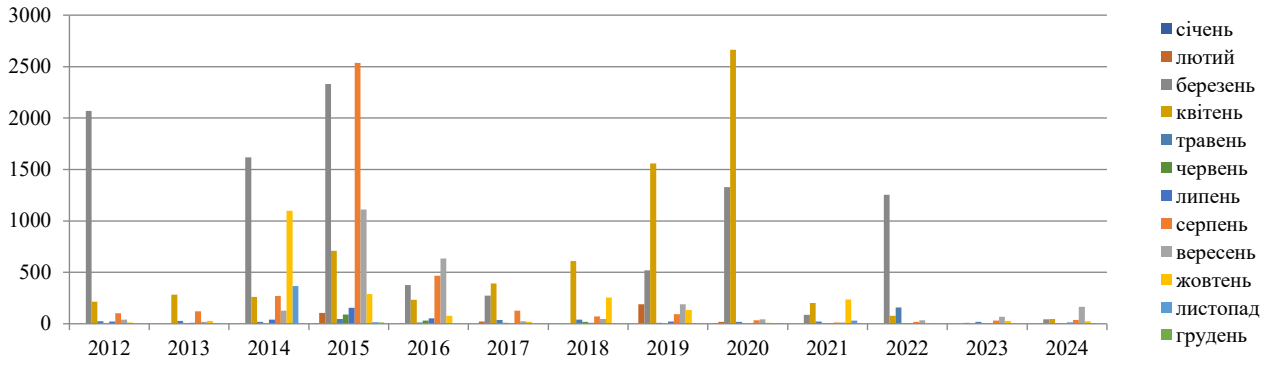


Рис. 6. Розподіл кількості пожеж за місяцями / Fig. 6. Distribution of the number of fires by month

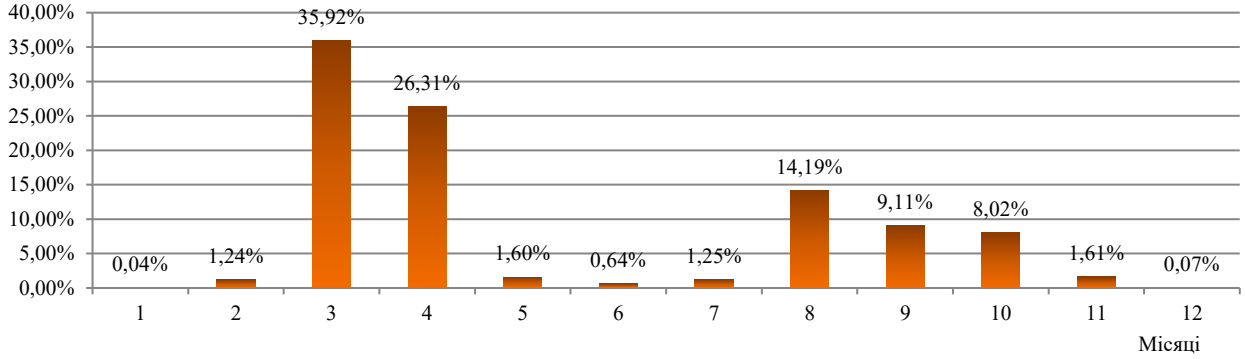


Рис. 7. Річний хід ймовірності виникнення пожеж у досліджуваному регіоні /
Fig. 7. Annual variation of the probability of fire occurrence in the studied region

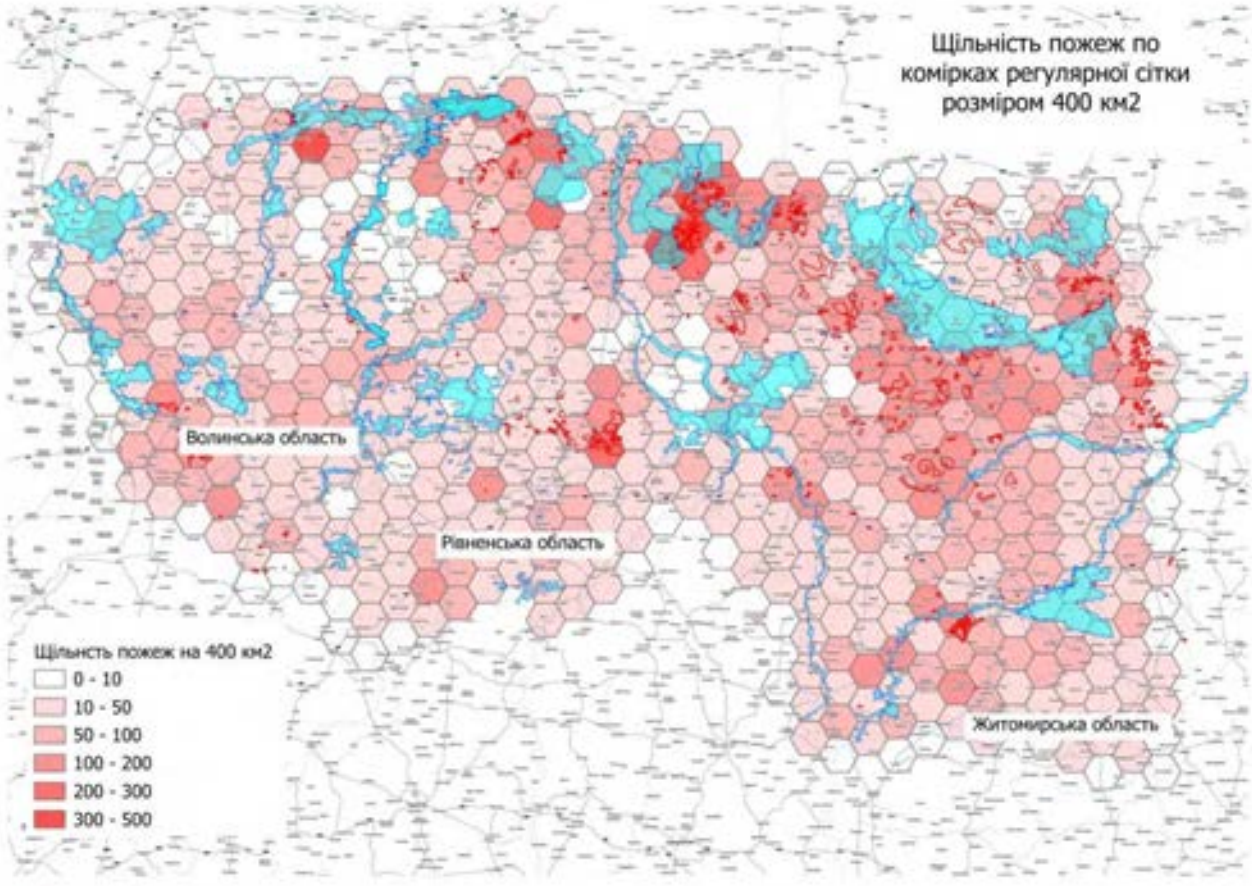


Рис. 8. Щільність пожеж, розрахована за комірками регулярної сітки /
Fig. 8. Fire density calculated by cells of a regular grid

Таблиця 1/ Table 1

Щільність зафіксованих термальних аномалій в межах територій Смарагдової мережі протягом 2012-24 рр. / Density of recorded thermal anomalies within the territories of the Emerald network during 2012-24

Назва території	Площа, га	К-сть пожеж, 2012-24	Щільність пожеж на км^2	Назва території	Площа, га	К-сть пожеж, 2012-24	Щільність пожеж на км^2
Чорногузка	2136	27	1,264	Долина р. Корчик	2271	4	0.176
Познань-Блажове	7624	80	1,049	Шацький	54128	81	0.150
Рівненський природний заповідник	42924	362	0.843	Долина р. Тетерів	51710	59	0.114
Нижній Случ	13532	107	0.791	Любохинівський	3793	4	0.105
Стохід-Нобель	41874	268	0.640	Цуманська Пуща	42852	44	0.103
Заплава Турії - Прип'ять	16196	92	0.568	Надслучанський регіональний ландшафтний парк	17248	17	0.099
Долина р. Стир у Волинській області	16847	93	0.552	Коростишівський	41696	41	0.098
Прип'ять-Стохід національний природний парк	38940	195	0.501	Долина р. Случ в Житомирській області	3572	3	0.084
Древлянський природний заповідник	32178	153	0.475	Городницький	54260	38	0.070
Овруцький	45237	213	0.471	Прибужжя	14263	9	0.063
Дубровицько-Сарнівський	39469	183	0.464	Хрінницький-Стир	5057	3	0.059
Західне Побужжя	14222	49	0.345	Турійський	17019	10	0.059
Поліський	36465	110	0.302	Західно-Овруцький	33452	19	0.057
Словечанський кряж	95849	256	0.267	Долина р. Бобер	7313	4	0.055
Дубровицький	38802	101	0.260	Черемський природний заповідник	2949	0	0.0
Дерманський-Острожський національний природний парк	5436	13	0.239	Марковичі	53	0	0.0
Долина р. Ірша в Житомирській області	1011	23	0.227	Череваський Ліс	1749	0	0.0
Долина р. Случ в Житомирській області	7746	16	0.207	Здолбунівські ставки	208	0	0.0

було використано датасет EFFIS Burnt Area product, а також автоматична класифікація за показником dNBR.

За 5 річний період в межах досліджуваних об'єктів проаналізовано 102 великі пожежі, оцінено їхні площі, локації та відсоток від загальної площі кожного об'єкта. Підсумкові результати для 19 об'єктів наведені у таблиці 2. У решті 17 об'єктах не зафіксовано жодного великого загоряння за цей період.

Загальна вигоріла площа орієнтовно становить 52,8 тис. га, що складає 6,2% від усієї площі територій Смарагдової мережі у цих областях. Але для кількох територій частка вигорілих площ становить понад 10%, для 7 – характерні загоряння на площі у тисячі гектарів.

За часом проходження пожеж протягом 2020-24 рр. виділяються всього кілька характер-

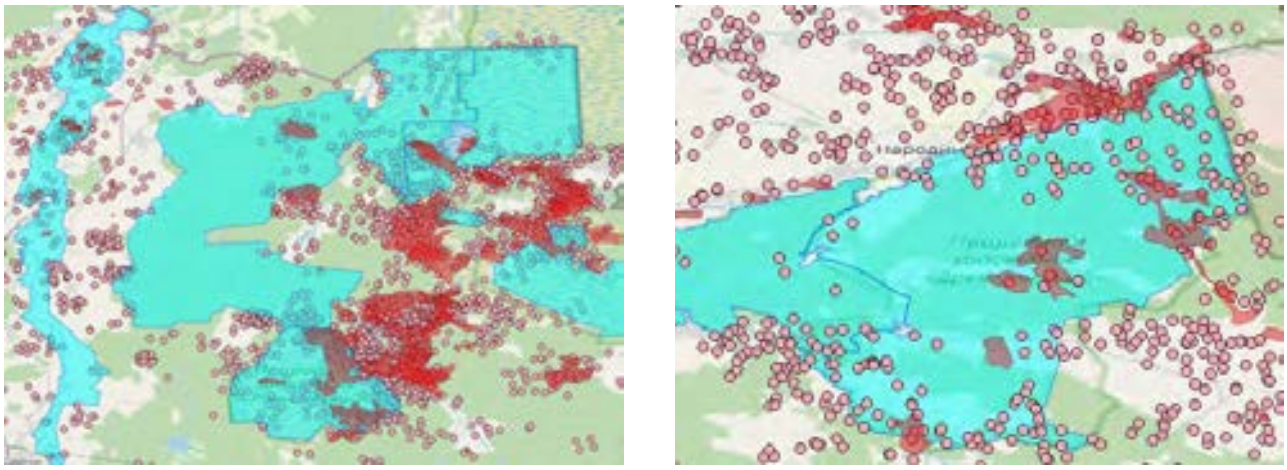


Рис. 9. Приклади розподілу щільності пожеж навколо окремих об'єктів мережі Emerald (зліва – Нижній Случ, Дубровицько-Сарнівський, Рівненський природний заповідник, справа – Древлянський природний заповідник) / Fig. 9. Examples of fire density distribution around individual Emerald sites (left: Nizhniy Sluch, Dubrovytsia-Sarnivtsi, Rivne Nature Reserve, right: Drevlyansky Nature Reserve)

Таблиця 2 / Table 2

Оцінка вигорілих площ в межах Смарагдової мережі протягом 2020-24 рр. / Estimation of burnt areas within the Emerald Network during 2020-24

Код території	Назва території	К-сть пожеж	Площа пожеж, га	Площа найбільшої пожежі	Площа пожеж, %
UA0000090	Овруцький	7	19057	2722,43	42,13
UA0000044	Прип'ять-Стохід національний природний парк	9	9085	1009,44	23,33
UA0000168	Стохід-Нобель	5	7793	1558,60	18,61
UA0000001	Поліський	5	3595	719,00	9,86
UA0000023	Рівненський природний заповідник	10	3724	372,40	8,68
UA0000172	Древлянський природний заповідник	7	2290	327,14	7,12
UA0000339	Познань-Блажове	4	340	85,00	4,46
UA0000173	Словечанський Кряж	19	4080	214,74	4,26
UA0000244	Нижній Случ	13	539	41,46	3,98
UA0000103	Дубровицько-Сарнівський	5	849	169,80	2,15
UA0000356	Долина р. Корчик	3	48	16,00	2,11
UA0000348	Долина р. Ірша в Житомирській області	2	162	81,00	1,60
UA0000167	Західне Побужжя	1	160	160,00	1,13
UA0000320	Долина р. Тетерів	3	565	188,33	1,09
UA0000334	Долина р. Стир у Волинській області	5	152	30,40	0,90
UA0000186	Дубровицький	1	213	213,00	0,55
UA0000112	Цуманська Пуща	1	103	103,00	0,24
UA0000102	Дермансько-Острожський національний природний парк	1	5	5,00	0,09
UA0000160	Городницький	1	38	38,00	0,07

них періодів: 20.03-11.05.2020 р. (36% від кількості усіх великих пожеж за 5 років, вигоріла площа 46,77 тис. га), 21.10-2.11.2021 (13%, 1,18 тис. га), 9.03-30.03.2022 (17%, 2,31 тис. га), 29.08-10.09.2024 (13%, 1,48 тис. га), 21.10-5.11.2024 (9%, 0,3 тис. га).

Весна 2020 р. вирізняється і за кількістю, і за площею пожеж (88,6% вигорілих площ), що, значною мірою, зумовлено поєднанням ряду екстремальних для Поліського регіону умов – практично безсніжної зими, мінімуму опадів та сильних вітрів, що сприяли висушуванню поверхневого шару ґрунту й рослинності. Пожежі серпня-вересня 2024 р. виникали на фоні тривалого бездощового періоду у поєднанні з стійкими високими температурами. Протягом березня 2022 р. частина займань, можливо, була зумовлена наслідками воєнних дій. Половина загорянь зафіксо-

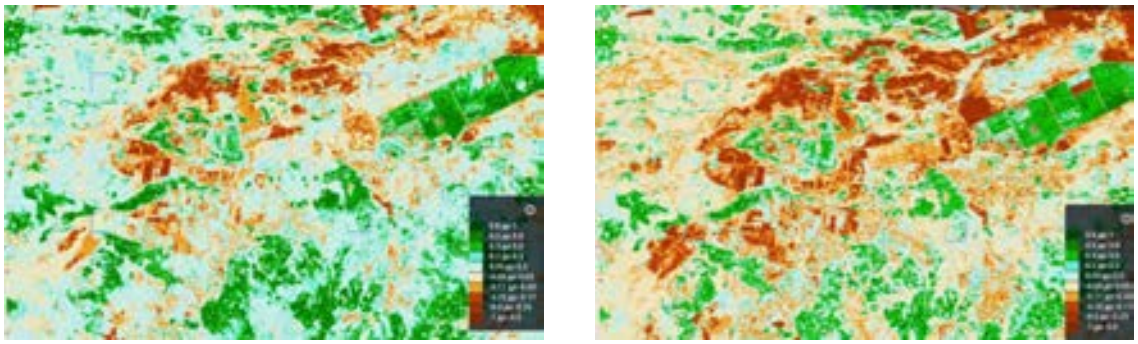


Рис. 10. Приклад розвитку масштабної пожежі в Стохід-Нобель, порівняння знімків Sentinel-2 за індексом NBR (Normalized burned ratio) у сервісі EOSDA LandViewer від 24.03.2020 р. і 11.04.2020 р. /
Fig. 10. An example of the development of a large-scale fire in Stokhid-Nobel, comparison of Sentinel-2 images by NBR (Normalized burned ratio) in the EOSDA LandViewer service from 03/24/2020 and 04/11/2020

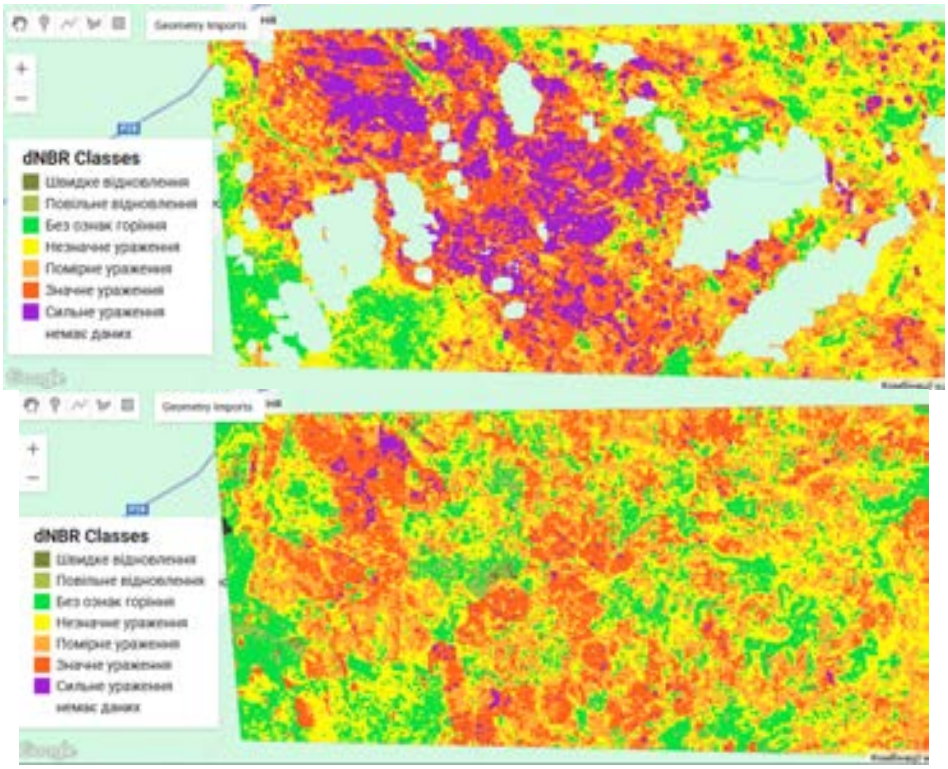


Рис. 11. Класифікації вигорілих земель в Овруцькому ASCI за NBR (Burn Severity Mapping у GoogleEarthEngine), верхній рисунок – за даними Landsat-8, червень 2020 р, нижній – за даними Landsat-8, червень 2024 р. /
Fig. 11. Classification of burnt lands in Ovruch ASCI by NBR (Burn Severity Mapping in Google EarthEngine), upper figure - according to Landsat-8 data, June 2020, lower figure - according to Landsat-8 data, June 2024

вана на території Смарагдової мережі Овруцький та Древлянський, близьких до кордону з РБ та Зони відчуження ЧАЕС, звідки відбувалась одна з хвиль вторгнення російських військ у лютому-березні 2022 р.

Класифікація територій за індексом NBR дозволяє оцінити площу, конфігурацію ареалів горіння, співставити їх із типами земельного покриву тощо. Для цього використано скрипт Burn Severity Mapping [16] у GoogleEarthEngine. Модифіковано його згідно області інтересу та відповідних дат, отримано ряд класифікацій вигорілих площ у об'єктах Смарагдової мережі.

Найбільша пожежа на ASCI Овруцький відбулась у квітні 2020 р. (рис. 11). Територія тут зайнята, переважно, хвойними і частково мішаними лісами. За 4 роки після пожежі значна частка оселищ ще не відновилась і має суттєві ознаки ураження. Натомість в межах інших територій (Прип'ять-Стохід, Стохід-Нобель), де рослинний покрив представлений, переважно, заплавною трав'яною рослинністю, властиві значно швидші темпи відновлення екосистем.

Розглянемо інший приклад просторової класифікації для ділянок із не лісовою рослинністю. А саме: пожежа у Рівненській області, в межах

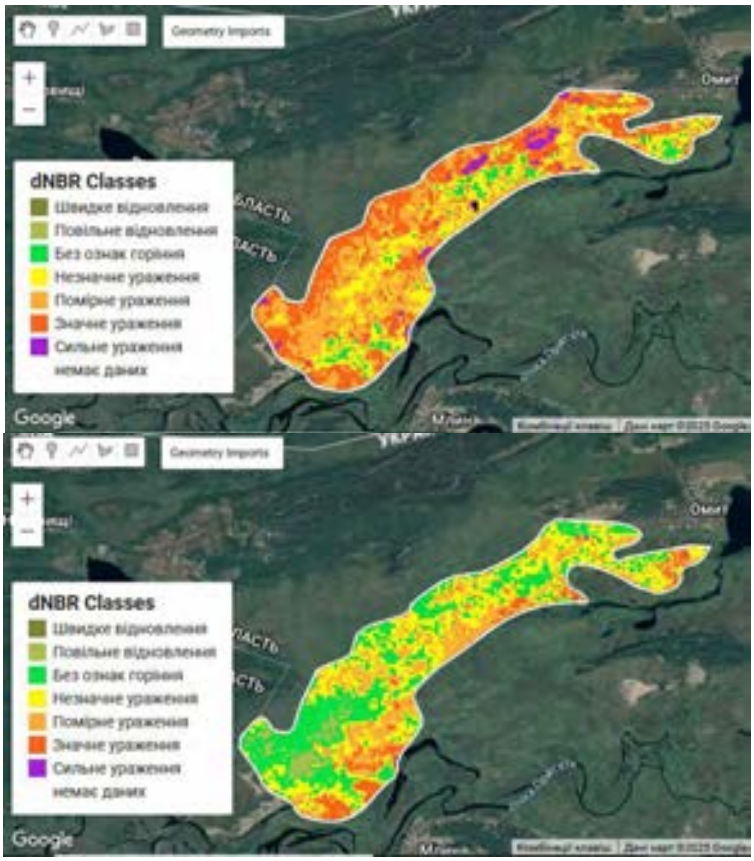


Рис. 12. Порівняння розрахованих класів Burnt severity mapping для пожежі у ASCI Стохід-Нобель 22-23.10.2021 р (верхнє зображення – станом на травень 2022 р., нижнє – на травень 2023 р.) /
Fig. 12. Compare the calculated Burnt severity mapping classes for the fire in ASCI Stochid-Nobel on 22-23.10.2021 (top image - as of May 2022, bottom image - as of May 2023)

території Смарагдової мережі Стохід-Нобель, що відбувалась 22-23.10.2021 р. (рис. 12). У датасеті burnt_areas площу горіння становить 408 га, в т.ч. 1,48% – мішаний ліс, 1,97% – оброблювані поля, а більшість (96,5%) – «інші природні», по факту лучно-болотні ландшафти заплави р. Прип'ять.

Оцінку ураження вогнем здійснювали модифікацією скрипта Burnt severity mapping у GoogleEarthEngine на періоди 0,5,-1,5 роки після пожежі.

Порівняно з лісовими ділянками ураженість території менша і закономірно зменшується з часом. За 1,5 року з часу пожежі площа ландшафтів із високою ураженістю зменшилась із 25,02 га (3,78%) до 3,15 га (0,48%), середня (moderate-high Severity) – із 31,89 до 7,21%, низька – із 38,43 до 24,92%. Натомість зросла частка території без виявлених ознак горіння – із 32,04 га (4,85%) до 199,26 га (30,11%). Також площа території поступового відновлення збільшилась із 0,05 до 3,75%.

Інший приклад – одна з найбільших виявлених не лісових пожеж на території Смарагдової мережі регіону. Вона відбулась 9-18.04.2020 р. у межах Національного природного парку «Прип'ять-Стохід» у Волинській області. Автоматично визначена площа пожежі склала 7843 га, з яких більша частина (79,69%) припадає на лучно-болотні екосистеми заплави р. Прип'ять, 15,42% – на мішаний ліс, 1,87% – на листяний ліс, 0,46% – на хвойний ліс, 2,5% – на сільськогосподарські землі. У даному випадку є деякі пробіли у класифікації, пов'язані із різними датами прольоту супутника для різних частин цієї досить великої території. Ця обставина разом із високою хмарністю ускладнювали побудову єдиної мозаїки. Тому обрані більші, ніж у попередньому прикладі, періоди оцінки.

Порівняння побудованих картосхем (рис. 13) також показує закономірне зростання площ відновленої території з часом. Частка території із значним ураженням за вказаний період зменшилася з 0,63% до 0,05%, частина з цих ділянок якраз припадає на лісові масиви у східній частині. Площа із середнім ступенем ураження впала у 8,2 рази із 18,53% (2349 га) до 2,26% (287,01 га), а із незначним ураженням змінились мало – із 16,41% до 14,54%. Площа території без ознак горіння зросла у 1,5 рази із 17,3% до 25,05%. Хоча й на початкових стадіях їх було більше 10%, що може свідчити про часткове завищення площі поширення пожежі у вихідному датасеті. На від-

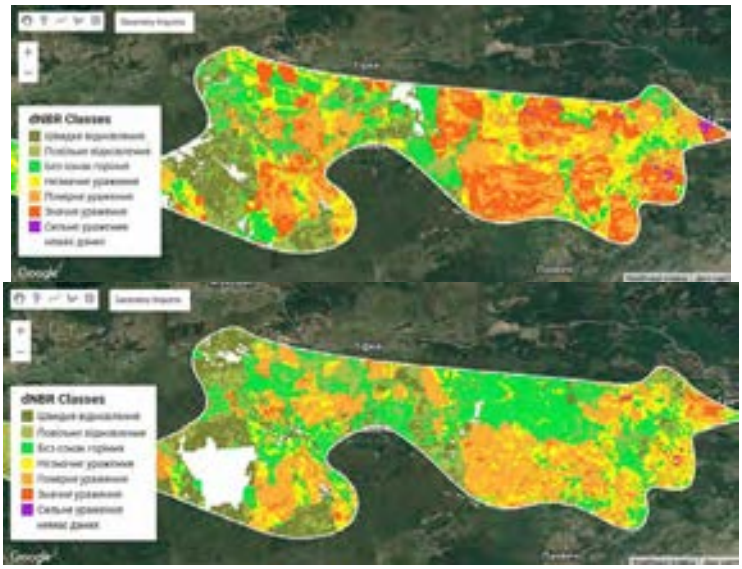


Рис.13. Порівняння розрахованих класів Burnt severity mapping для пожежі у ASCI Прип'ять-Стохід національний природний парк 9-18.04.2020 р. (верхнє зображення – станом на травень 2022 р., нижнє – на травень 2024 р.) /
Fig. 13. Comparison of the calculated Burnt severity mapping classes for the fire in ASCI Prypiat-Stokhid National Nature Park on 9-18.04.2020 (top image - as of May 2022, bottom image - as of May 2024)

міну від Стохід-Нобель, на цій території визначаються значні площі відновлення рослинного покриву – 22,83% станом на 2022 р. і 33,2% у 2024 р., причому площа ділянок із швидким відновленням теж більша (19,5%).

Дискусія і висновки. Найчастіше уражались пожежами лучні екосистеми. Це свідчить про їх невисоку стійкість та критичну необхідність дотримання правил запобігання виникненню пожеж. В розрізі регіонів спостерігалась цікава відмінність: на Житомирському Поліссі частіше загорялись лісові масиви (Словечанський кряж, Древлянський заповідник, Овруцький, Поліський), рідше – луки та сільськогосподарські землі (Долина р. Тетерев, Долина р. Ірші, Долина р. Корчик). На Волинському Поліссі значно частіше були пожежі у лучних екосистемах, або спільно на луках та сільськогосподарських землях (Прип'ять-Стохід національний природний парк, Стохід-Нобель, Нижній Случ, Дубровицько-Сарнівський, Долина р. Стир у Волинській області). Лісові пожежі траплялись значно рідше, зафіксовані буквально одиничні випадки (Західне Побужжя, Цуманська Пуща, Рівненський природний заповідник, Дубровицький). Території Смарагдової мережі із переважанням заплавно-лучної рослинності показують значно кращі та швидші показники відновлення. Але, поряд з цим, частота виникнення пожеж та можливість повторного ураження тут теж суттєво вищі.

Таким чином, попри різну структуру та статус охорони, території мережі Emerald переважно забезпечують вищу збереженість біотопів від загроз вогню. Але у зв'язку із зростаючими кліматичними та антропогенними загрозами, ці території також потребують деталізованого моніторингу та розширеного захисту. Ефективне управління пожежами в межах Смарагдової мережі потребує комплексного підходу, зокрема, картографування ризиків із зонуванням територій за рівнем небезпеки. До територій із високим ризиком відносяться соснові ліси та торфовища, помірним ризиком – мішані ліси, низьким ризиком – вологі екосистеми (водно-болотні угіддя). Також дуже важливим є прогнозування пожеж із розробкою календаря небезпечних періодів.

Стратегії попередження охоплюють превентивні заходи створення протипожежних розривів, контрольованих випалів та облаштування водойм, а також систему моніторингу через відеоспостереження, патрулювання та використання дронів. Управління після пожеж передбачає оцінку збитків із картуванням пошкоджених територій та реабілітаційні заходи від природного відновлення до активних втручань.

Список використаних джерел

1. *Baró, R., Maurer, C., Brioude, J., Arnold, D., & Hirtl, M. (2021). The environmental effects of the April 2020 wildfires and the Cs-137 re-suspension in the Chernobyl exclusion zone: A multi-hazard threat. Atmosphere, 12(4), 467.* https://doi.org/10.3390/atmos12040467

2. *Boychenko, S., Kuchma, T., Karamushka, V., Maidanovych, N., & Kozak, O. (2025). Wildfires and climate change in the Ukrainian Polissia during 2001–2023. Sustainability, 17(5), 2223. https://doi.org/10.3390/su17052223*
3. *Buksha, I. F., Pyvovar, T. S., Buksha, M. I., Pasternak, V. P., & Buksha, T. I. (2021). Modelling and forecasting the impact of climate change on forests of Ukraine for 21st century time horizon. Ideas, 27, 470–482.*
4. *Emerald Network - General Viewer. Retrieved from https://emerald.eea.europa.eu/*
5. *Fedoniuk, M., Kovalchuk, I., Fesyuk, V., Fedoniuk, V., & Zhadko, O. (2025). Spatial analysis of wildfire occurrence in the Emerald Network sites of Volyn and Zhytomyr Polissia (2012–2024). In 19th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (Vol. 2025, No. 1, pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510070.*
6. *Fesyuk, V. O., Moroz, I. A., Chyzhevska, L. T., Karpiuk, Z. K., & Polianskyi, S. V. (2020). Burned peatlands within the Volyn region: State, dynamics, threats, ways of further use. Journal of Geology, Geography and Geoecology, 29(3), 483–494. https://doi.org/10.15421/112043*
7. *Фесюк В., Мороз І., Федонюк, М., Мельник, О., Полянський С. (2023). Методика та практична імплементація дослідження зміни лісистості Волинської області із використанням методів ДЗЗ. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (58), 274–289. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-21*
8. *Фесюк В. О., Мороз І. А., Карпюк З. К. & Полянський С. В. (2018). Об'єкти та території Смарагдової мережі Волинської області. Природні ресурси регіону: проблеми використання, ревіталізації та охорони. Матеріали ІІІ-ого міжнародного наукового семінару, 338-341.*
9. *Flannigan, M. D., Bergeron, Y., Engelmark, O., & Wotton, B. M. (1998). Future wildfire in circumboreal forests in relation to global warming. Journal of Vegetation Science, 9, 469–476. https://doi.org/10.2307/3237261*
10. *Fosberg, M. A., Goldammer, J. G., Rind, D., & Price, C. (1990). Global change: Effects on forest ecosystems and wildfire severity. In Fire in the tropical biota: Ecosystem processes and global challenges (pp. 463–486).*
11. *Gumeniuk, V., Holiaka, D., Soshenskiy, O., & Koren, V. (2021). Effects of surface fires on Scots pine forests of the Poliskyi Nature Reserve. Forestry Ideas, 27(1), 61.*
12. *Jolly, W. M., Cochrane, M. A., Freeborn, P. H., Holden, Z. A., Brown, T. J., Williamson, G. J., & Bowman, D. M. (2015). Climate-induced variations in global forest fire danger from 1979 to 2013. Nature Communications, 6, 7537. https://doi.org/10.1038/ncomms8537*
13. *Karamushka, V., Kuchma, T., Boychenko, S., & Nazarova, O. (2023, November). Climate change and fires in the Ukrainian Polissia region. In 17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (Vol. 2023, No. 1, pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers.*
14. *Kovalchuk, I., Fedoniuk, M., Kovalchuk, I., Fedoniuk, V., & Vovk, O. (2024, October). Analysis of wildfire occurrence based on remote data in the Lutsk district (2012–2022). In International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2024" (Vol. 2024, No. 1, pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers.*
15. *Krakovska, S., Buksha, I., & Shvidenko, A. (2017). Climate change scenarios for an assessment of vulnerability of forests in Ukraine in the 21st century. Aerul si Apa. Componente ale Mediului, 387–394. https://doi.org/10.24193/AWC2017_49*
16. *Kussul, N., Fedorov, O., Yailymov, B., Pidgorodetska, L., Kolos, L., Yailymova, H., & Shelestov, A. (2023). Fire hazard assessment using moderate-spatial resolution satellite data. Fire, 6(2), 72. https://doi.org/10.3390/fire6020072*
17. *Кузик, А. Д., & Драч, К. Л. (2016). Пожежна небезпека найпоширеніших трав'янистих рослин лук Західної України. Пожежна безпека: Збірник наукових праць. ЛДУ БЖД, 29, 87–92.*
18. *List of officially adopted Emerald Network sites (December 2020). Retrieved from https://rm.coe.int/updated-list-of-officially-adopted-emerald-sites-2020/1680a080d5*
19. *Левченко, В. Б., Романюк, А. А., & Ткаченко, М. В. (2023). Патології та пірогенний стан соснових лісів Поліського природного заповідника. Лісівництво, деревообробка та озеленення: стан, досягнення і перспективи (24–25 жовтня 2023 р.).*
20. *НУБіП України (2020). Звіт про науково-дослідну роботу «Науково-методичне забезпечення створення геопорталу для оцінювання ризику, прогнозування та попередження природних пожеж у Поліссі України» (2018-2020 рр.). Міністерство освіти та науки України, № держреєстрації № 0118U000312.*
21. *Pausas, J. G., & Keeley, J. E. (2021). Wildfires and global change. Frontiers in Ecology and the Environment, 19(7), 387–395. https://doi.org/10.1002/fee.2359*
22. *Prokopchuk, A., & Korbutiak, V. (n.d.). Mon25-154 Geoinformation support for fire occurrence analysis: A case study of the Rivne Nature Reserve. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510154.*
23. *Robinne, F. N., Burns, J., Kant, P., Flannigan, M., Kleine, M., de Groot, B., & Wotton, D. M. (2018). Global fire challenges in a warming world. Occasional Paper No. 32. IUFRO, Vienna.*
24. *San-Miguel-Ayanz, J., Schulte, E., Schmuck, G., Camia, A., Strobl, P., Libertà, G., ... & Amatulli, G. (2012). Comprehensive monitoring of wildfires in Europe: The European Forest Fire Information System (EFFIS). In J. Tiefenbacher (Ed.), Approaches to Managing Disaster – Assessing Hazards, Emergencies and Disaster Impacts (pp. 87–105). InTech. https://doi.org/10.5772/28441*
25. *Savenets, M., Osadchyi, V., Oreshchenko, A., & Pysarenko, L. (2020). Air quality changes in Ukraine during the April 2020 wildfire event. Geographica Pannonica, 24(4). https://doi.org/10.5937/gp24-27436*

26. *Soshenskyi, O., Zibtsev, S., Gumeniuk, V., Goldammer, J. G., Vasylyshyn, R., & Blyshchyk, V. (2021). The current landscape fire management in Ukraine and strategy for its improvement. Environmental & Socio-economic Studies, 9(2), 39–51.* https://doi.org/10.2478/environ-2021-0009
27. *Сошенський, О.М., Зібцев, С. В., Терентьєв, А. Ю., Воротинський, О. Г. (2021) Наслідки катастрофічних ландшафтних пожеж в Україні для лісових екосистем та населення. Український журнал лісівництва та деревинознавства. 12(3), 21.* https://doi.org/10.31548/forest2021.03.002
28. *Sydorenko, S., Gumeniuk, V., De Miguel-Díez, F., et al. (2024). Assessment of the surface forest fuel load in the Ukrainian Polissia. Fire Ecology, 20, 35.* https://doi.org/10.1186/s42408-024-00265-z
29. *Torn, M. S., & Fried, J. S. (1992). Predicting the impacts of global warming on wildland fire. Climatic Change, 21(3), 257–274.* https://doi.org/10.1007/BF00139726
30. *Зібцев, С. В., Миронюк, В.В., Сошенський, О. М., Корень, М. С., Корень, В. А. (2019). Просторово-часовий розподіл пожеж у природних ландшафтах Рівненської області. Науковий вісник НЛТУ України, 29(6), 18–23.* https://doi.org/10.15421/40290603
31. *Зібцев, С. В., Сошенський, О. М., Миронюк, В.В., Гуменюк, В.В. (2020). Ландшафтні пожежі в Україні: поточна ситуація та аналіз чинної системи охорони природних територій від пожеж. Український журнал лісівництва та деревинознавства, 11(2), 15-31.* https://doi.org/10.31548/forest2020.02.015
32. *Зібцев, С. В., Сошенський, О. М., Миронюк, В. В., & Гуменюк, В. В. (2019). Моніторинг ландшафтних пожеж Транскордонної Рамсарської території Ольмани-Перебороди за даними дистанційного зондування Землі. Лісівництво і агролісомеліорація, (134), 88-95.* https://doi.org/10.33220/1026-3365.134.2019.88

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу
Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Methodology and practical implementation of assessing the scale and consequences of fires within the Emerald network of Volyn and Zhytomyr Polissya using remote sensing

Vasyl Fesyuk [1]
DSc (Geography), Professor, Department of Physical Geography,
[1] Lesya Ukrainka Volyn National University, Lutsk, Ukraine;
Mykola Fedonyuk [2]
PhD (Geography), Associate Professor, Department of Ecology,
[2] Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine;
Iryna Moroz [2]
PhD (Chemistry), Associate Professor, Department of Food Technology and Chemistry;
Vitalina Fedonyuk [2]
PhD (Geography), Associate Professor, Department of Ecology

ABSTRACT

Introduction. Climate change, anthropogenic pressure and wildfires are key threats to ecosystems, including unique protected areas. The sites of the Emerald Network in Volyn and Zhytomyr Polissya are important for the conservation of biodiversity at the national and European levels, but at the same time suffer from the negative effects of fires.

The purpose of article is to develop and test a methodology for assessing the scale and consequences of fires within the Emerald Network sites in Volyn and Zhytomyr Polissya using remote sensing data, taking into account the specific natural conditions of the region and the specific nature conservation status of the territories.

The object of the study is the natural complexes of the Emerald Network sites in Volyn and Zhytomyr Polissya that are affected by fires.

The subject of the study is the regularities of the spread and spatial distribution of fires within the Emerald Network sites of Volyn and Zhytomyr Polissya.

Data and methods. The European Forest Fire Information System (EFFIS) service was used to obtain the initial data. From there, a data array on thermal anomalies recorded by the MODIS Aqua and MODIS Terra satellites during 2012-24 was downloaded. Data sampling was carried out for the territories of Volyn, Rivne, and Zhytomyr regions of Ukraine. The main statistical indicators of fire occurrence for this period were calculated. A corresponding vector data layer was created in QGIS. The density of hot spots was calculated for each cell of a regular grid. A layer of Emerald Network object contours was created for the area of interest, based on data from the Emerald Network by European Environment Agency portal. The number of hot spots within each Emerald Network territory was calculated.

Results. It was found that meadow ecosystems were most often affected by fires. This indicates their low resilience and the need to comply with fire prevention rules. Despite their different structure and protection status, the Emerald Network areas provide better protection of habitats from fire threats. This is evidenced by GIS and statistical analysis of the dataset on the intensity and frequency of fires.

The scientific novelty. An integrated approach is proposed for identifying fire hotspots, assessing affected areas, and classifying the degree of impact on natural ecosystems, in particular on protected habitats and species.

Practical significance. The proposed methodology allows for the optimization of satellite data use for risk assessment and restoration of disturbed ecosystems.

***Keywords**: fires in ecosystems, scale and consequences of fires, fire hotspots, thermal points, thermal anomalies, fire density, fire frequency, Emerald Network territories.*

References

1. *Baró, R., Maurer, C., Brioude, J., Arnold, D., & Hirtl, M. (2021). The environmental effects of the April 2020 wildfires and the Cs-137 re-suspension in the Chernobyl exclusion zone: A multi-hazard threat. Atmosphere, 12(4), 467. https://doi.org/10.3390/atmos12040467*
2. *Boychenko, S., Kuchma, T., Karamushka, V., Maidanovych, N., & Kozak, O. (2025). Wildfires and climate change in the Ukrainian Polissia during 2001–2023. Sustainability, 17(5), 2223. https://doi.org/10.3390/su17052223*
3. *Buksha, I. F., Pyvovar, T. S., Buksha, M. I., Pasternak, V. P., & Buksha, T. I. (2021). Modelling and forecasting the impact of climate change on forests of Ukraine for 21st century time horizon. Ideas, 27, 470–482.*
4. *Emerald Network - General Viewer. Retrieved from https://emerald.eea.europa.eu/*
5. *Fedoniuk, M., Kovalchuk, I., Fesyuk, V., Fedoniuk, V., & Zhadko, O. (2025). Spatial analysis of wildfire occurrence in the Emerald Network sites of Volyn and Zhytomyr Polissia (2012–2024). In 19th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment. 2025, 1: 1–5. European Association of Geoscientists & Engineers. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510070.*
6. *Fesyuk, V. O., Moroz, I. A., Chyzhevska, L. T., Karpiuk, Z. K., & Polianskyi, S. V. (2020). Burned peatlands within the Volyn region: State, dynamics, threats, ways of further use. Journal of Geology, Geography and Geoecology, 29(3), 483–494. https://doi.org/10.15421/112043*
7. *Fesyuk, V., Moroz, I., Fedonyuk, M., Melnyk, O., & Polyanskyi, S. (2023). Methodology and practical implementation of research of changes in forest coverage of Volyn region using remote sensing. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (58), 274–289. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-21 [in Ukrainian]*
8. *Fesiuk, V. O., Moroz, I. A., Karpiuk, Z. K., & Polianskyi, S. V. (2018). Objects and territories of the Emerald Network of Volyn region. Natural resources of the region: problems of use, revitalization and protection: Materials of the 3rd international scientific seminar, 338-341. [In Ukrainian]*
9. *Flannigan, M. D., Bergeron, Y., Engelmark, O., & Wotton, B. M. (1998). Future wildfire in circumboreal forests in relation to global warming. Journal of Vegetation Science, 9, 469–476. https://doi.org/10.2307/3237261*
10. *Fosberg, M. A., Goldammer, J. G., Rind, D., & Price, C. (1990). Global change: Effects on forest ecosystems and wildfire severity. In Fire in the tropical biota: Ecosystem processes and global challenges (pp. 463–486).*
11. *Gumeniuk, V., Holiaka, D., Soshenskiy, O., & Koren, V. (2021). Effects of surface fires on Scots pine forests of the Poliskyi Nature Reserve. Forestry Ideas, 27(1), 61.*
12. *Jolly, W. M., Cochrane, M. A., Freeborn, P. H., Holden, Z. A., Brown, T. J., Williamson, G. J., & Bowman, D. M. (2015). Climate-induced variations in global forest fire danger from 1979 to 2013. Nature Communications, 6, 7537. https://doi.org/10.1038/ncomms8537*
13. *Karamushka, V., Kuchma, T., Boychenko, S., & Nazarova, O. (2023, November). Climate change and fires in the Ukrainian Polissia region. In 17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (Vol. 2023, No. 1, pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers.*
14. *Kovalchuk, I., Fedoniuk, M., Kovalchuk, I., Fedoniuk, V., & Vovk, O. (2024, October). Analysis of wildfire occurrence based on remote data in the Lutsk district (2012–2022). In International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2024" (Vol. 2024, No. 1, pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers.*
15. *Krakovska, S., Buksha, I., & Shvidenko, A. (2017). Climate change scenarios for an assessment of vulnerability of forests in Ukraine in the 21st century. Aerul si Apa. Componente ale Mediului, 387–394. https://doi.org/10.24193/AWC2017_49*
16. *Kussul, N., Fedorov, O., Yailymov, B., Pidgorodetska, L., Kolos, L., Yailymova, H., & Shelestov, A. (2023). Fire hazard assessment using moderate-spatial resolution satellite data. Fire, 6(2), 72. https://doi.org/10.3390/fire6020072*
17. *Kuzyk, A. D., Drach, K. L. (2016). Fire danger of the most common herbal bow plants in western Ukraine. Fire Safety, 29, 87-92. [in Ukrainian]*
18. *List of officially adopted Emerald Network sites (December 2020). Retrieved from https://rm.coe.int/updated-list-of-officially-adopted-emerald-sites-2020/1680a080d5*
19. *Levchenko, V. B., Romaniuk, A. A., & Tkachenko, M. V. (2023). Pathology and pyrogenic state of pine forests of the Polissia Nature Reserve. Forestry, woodworking and landscaping: state, achievements and prospects (October 24-25, 2023). [in Ukrainian]*
20. *NUBIP of Ukraine. (2020). Research report: Scientific and methodological support for the creation of geoportal for risk assessment, forecasting and prevention of wildfire in the Polissya of Ukraine. Ministry of Education and Science of Ukraine. State registration number: 0118U000312.*
21. *Pausas, J. G., & Keeley, J. E. (2021). Wildfires and global change. Frontiers in Ecology and the Environment, 19(7), 387–395. https://doi.org/10.1002/fee.2359*

22. *Prokopchuk, A., & Korbutiak, V. (n.d.). Mon25-154 Geoinformation support for fire occurrence analysis: A case study of the Rivne Nature Reserve. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510154.*
23. *Robinne, F. N., Burns, J., Kant, P., Flannigan, M., Kleine, M., de Groot, B., & Wotton, D. M. (2018). Global fire challenges in a warming world. Occasional Paper No. 32. IUFRO, Vienna.*
24. *San-Miguel-Ayanz, J., Schulte, E., Schmuck, G., Camia, A., Strobl, P., Libertà, G., ... & Amatulli, G. (2012). Comprehensive monitoring of wildfires in Europe: The European Forest Fire Information System (EFFIS). In J. Tiefenbacher (Ed.), Approaches to Managing Disaster – Assessing Hazards, Emergencies and Disaster Impacts (pp. 87–105). InTech. https://doi.org/10.5772/28441*
25. *Savenets, M., Osadchyi, V., Oreshchenko, A., & Pysarenko, L. (2020). Air quality changes in Ukraine during the April 2020 wildfire event. Geographica Pannonica, 24(4). https://doi.org/10.5937/gp24-27436*
26. *Soshenskyi, O., Zibtsev, S., Gumeniuk, V., Goldammer, J. G., Vasylyshyn, R., & Blyshchyk, V. (2021). The current landscape fire management in Ukraine and strategy for its improvement. Environmental & Socio-economic Studies, 9(2), 39–51. https://doi.org/10.2478/environ-2021-0009*
27. *Soshenskyi, O., Zibtsev, S., Terentiev, A., & Vorotynskyi, O. (2021). Consequences of catastrophic landscape fires in Ukraine for forest ecosystems and population. Ukrainian Journal of Forest and Wood Science, 12(3), 21. https://doi.org/10.31548/forest2021.03.002. [in Ukrainian]*
28. *Sydorenko, S., Gumeniuk, V., De Miguel-Díez, F., et al. (2024). Assessment of the surface forest fuel load in the Ukrainian Polissia. Fire Ecology, 20, 35. https://doi.org/10.1186/s42408-024-00265-z*
29. *Torn, M. S., & Fried, J. S. (1992). Predicting the impacts of global warming on wildland fire. Climatic Change, 21(3), 257–274. https://doi.org/10.1007/BF00139726*
30. *Zibtsev, S., Myroniuk, V., Soshenskyi, O., Koren, M., & Koren, V. (2019). Wildfire regimes of natural landscapes of the Rivne region of Ukraine. Scientific Bulletin of UNFU, 29(6), 18–23. https://doi.org/10.15421/40290603. [in Ukrainian]*
31. *Zibtsev, S., Soshenskyi, O., Myroniuk, V., & Gumeniuk, V. (2020). Wildfire in Ukraine: An overview of fires and fire management system. Ukrainian Journal of Forest and Wood Science, 11(2), 15. https://doi.org/10.31548/forest2020.02.015. [in Ukrainian]*
32. *Zibtsev, S., Soshenskyi, O., Myroniuk, V., & Gumeniuk, V. (2019). Monitoring of landscape fires of the Cross-border Ramsar Territory "Olmany-Perebrody" according to remote sensing. Forestry and Agroforestry, 134, 88–95. https://doi.org/10.31548/forest2020.02.015 [in Ukrainian]*

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 2 June 2025
Accepted 25 July 2025

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-34
UDC 351:502.131.1:330.15
Received 2 October 2025
Accepted 4 November 2025

Economic, environmental and social dimensions of green transformation in Ukraine: aspects of management in conditions of war and post-war reconstruction

Maksym Khozhylo
PhD (Technical), Doctoral Student of Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine,
e-mail: khozhylo.m@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-1841-4490

ABSTRACT

Purpose. The purpose of the article is to analyze and assess the effectiveness of existing financial and economic instruments of the green transformation in Ukraine's public administration, and to provide a rationale for improving specific areas in the post-war reconstruction context.

Methods. The research is based on a systemic and comparative analysis of regulatory frameworks, policy documents, and statistical data related to Ukraine's green transformation. Qualitative and analytical methods were used to identify barriers to effective policy implementation, while comparative assessment allowed evaluation of Ukraine's mechanisms in the context of EU environmental and fiscal practices. The study also incorporates expert assessments and secondary data from international organizations such as the OECD, World Bank, and UNEP.

Results. The analysis revealed several structural barriers hindering the effectiveness of financial and economic instruments for the green transition. These include policy fragmentation, lack of an integrated national strategy, overlapping departmental functions, and high corruption risks. The impact of the full-scale war has significantly reshaped the priorities of public administration, redirecting fiscal resources toward defense, increasing infrastructure destruction, and slowing green investment. Nevertheless, the post-war recovery period presents opportunities to integrate sustainability principles into the reconstruction process. The key principles of achieving sustainable development goals are determined by the economic, environmental and social components. Criteria for their measurement have been established: economic criteria show how effectively financial resources are used to achieve green goals. Environmental criteria directly measure the impact of the mechanism on the state of the environment. Social and institutional criteria reflect the impact of the mechanism on society and the effectiveness of public administration. The application of these criteria will allow not only to state the fact of the implementation of green policy, but also to objectively assess its effectiveness, identify weaknesses and substantiate recommendations for its improvement.

Conclusions. The study concludes that Ukraine's post-war recovery represents a unique opportunity for a "green leap," enabling structural modernization of the national economy according to sustainable principles. Effective implementation of fiscal and institutional reforms, combined with enhanced transparency and public accountability, can accelerate Ukraine's integration into the European Green Deal and global sustainability frameworks.

***Keywords**: green transformation, environmental policy, European Green Deal, economic mechanisms, public administration, sustainable development, investment policy, institutional changes, post-war recovery, environment.*

In cites: Khozhylo Maksym (2025). Economic, environmental and social dimensions of green transformation in Ukraine: aspects of management in conditions of war and post-war reconstruction. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 468-478. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-34

Introduction. The green transformation of the economy is one of the main priorities of modern global policy aimed at ensuring sustainable development, reducing environmental risks and increasing competitiveness. In Ukraine, given the need for integration into the European space, as well as the challenges associated with post-war reconstruction and modernization, the urgency of this matter is intensifying.

Despite the presence of individual initiatives and strategies in the field of environmental policy, there is an issue of insufficient effectiveness of existing financial and economic instruments and mechanisms of public administration to ensure a comprehensive and systemic green transformation. The modern system of public administration in Ukraine faces such challenges as

– fragmentation of financial and economic instruments – the absence of a single, coordinated public policy, which leads to dispersion of efforts and a decrease in the synergistic effect;

– insufficient financial support – limited budget resources and low involvement of private capital into green projects;

– weakness of the institutional environment – bureaucratic obstacles, imperfect legislative framework and lack of effective monitoring of the implementation of green initiatives;

– low investment attractiveness – insufficient level of guarantees and risks for investors, which inhibits the inflow of funds into the relevant sectors.

Thus, the relevance of the study lies in the need to develop and substantiate new, adapted to Ukrainian realities, financial and economic instruments and mechanisms of public administration that will be able to ensure the effective green transformation, promote post-war reconstruction and achieve sustainable development goals.

© Khozhylo Maksym, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Analysis of recent research and publications shows that the issue of financial and economic instruments and mechanisms of the green transformation in Ukraine's public administration is relevant and actively discussed, especially in the context of post-war reconstruction (Bilokinna I. [1], Dzyubak K. [3], Kolyada T., Prozorov Yu. [7], Medynska N. [9], Osipova L. [10], Petrakov Ya. [12], Pshybelsky V. [14], Skal O. [16], Skoryk M. [17], Sachs, J. [15], etc.). Some studies show that, despite the war, some communities in Ukraine are already implementing green projects using various green technologies (Dyachuk A., Efremova O., Mateyuk O., Shevchenko S. [4], Maksymenko N. [8], Petrova I. [13], etc.).

The purpose of the article is to analyze and assess the effectiveness of existing financial and economic instruments of the green transformation in Ukraine's public administration, and to provide a rationale for improving specific areas in the post-war reconstruction context.

Methods. The research is based on a systemic and comparative analysis of regulatory frameworks, policy documents, and statistical data related to Ukraine's green transformation. Qualitative and analytical methods were used to identify barriers to effective policy implementation, while comparative assessment allowed evaluation of Ukraine's mechanisms in the context of EU environmental and fiscal practices. The study also incorporates expert assessments and secondary data from international organizations such as the OECD, World Bank, and UNEP.

Presentation of the main material. Public administration is a central subject in the process of the green transformation, since it has unique powers and tools that are not available to other participants. The state performs a number of key functions, including

– regulatory and legal – only the state can create and implement a legislative framework that regulates environmental standards, emission standards, and requirements for the use of natural resources. These rules create uniform "playing conditions" for all economic entities, forcing them to adapt to green requirements

– fiscal and budgetary – public administration controls budgetary and tax levers. With the help of the environmental tax, subsidies, grants, and state funding programs, it can stimulate or inhibit certain types of economic activity, which allows for the effective redistribution of financial flows in favor of environmentally friendly projects;

– strategy and coordination – the green transformation is a long-term and complex process that requires coordination of actions of many sectors of the economy. The state is the only institution capable of developing and implementing national strategies, integrating them with international obligations (for example, with the European Green Deal) and coordinating the efforts of various ministries, departments, and regions;

– investment and innovation – the state can act as a major investor into green infrastructure (for example, public transport, energy networks), as well as stimulate private investment by providing state guarantees, soft loans, and other mechanisms. It also supports scientific research and development in the field of green technologies, creating an innovative base for transformation.

A more detailed consideration should be now given to the financial and economic instruments and mechanisms underpinning the green transformation in Ukraine's public administration. However, first of all, it should be noted that financial and economic instruments are mechanisms that the state or other entities use to impact economic processes, market behavior, enterprises, and the population. These instruments serve to achieve certain economic goals, such as stimulating growth, regulating inflation, supporting certain sectors of the economy or, as in this particular case, promoting green transformation.

Financial and economic instruments can be conditionally divided into four groups:

1) fiscal instruments – instruments related to the state budget, for example, taxes (environmental tax, tax breaks for green companies), subsidies and grants (for example, a green tariff);

2) monetary instruments – those related to the money supply and credit policy (for example, changing the discount rate, refinancing, open market operations);

3) market instruments – those creating economic incentives, but working through market mechanisms (examples: emissions trading, the "polluter pays" mechanism, green bonds);

4) investment instruments – instruments aimed at attracting capital to certain sectors (for example, government grants, soft loans for investments in renewable energy, creation of environmental funds) [3; 6].

In the context of the green transformation, these tools play a key role in reorienting the economy from traditional, environmentally harmful industries toward environmentally sustainable and innovative ones.

Taking the above into consideration, a schematic representation of the functioning of financial and economic instruments in Ukraine's green transformation will now be provided (Fig. 1).

The figure shows a complex system of financial and economic levers of public administration aimed at stimulating the green transformation of the economy, and consisting of four groups of instruments - tax, budget and subsidy, market, and finance and

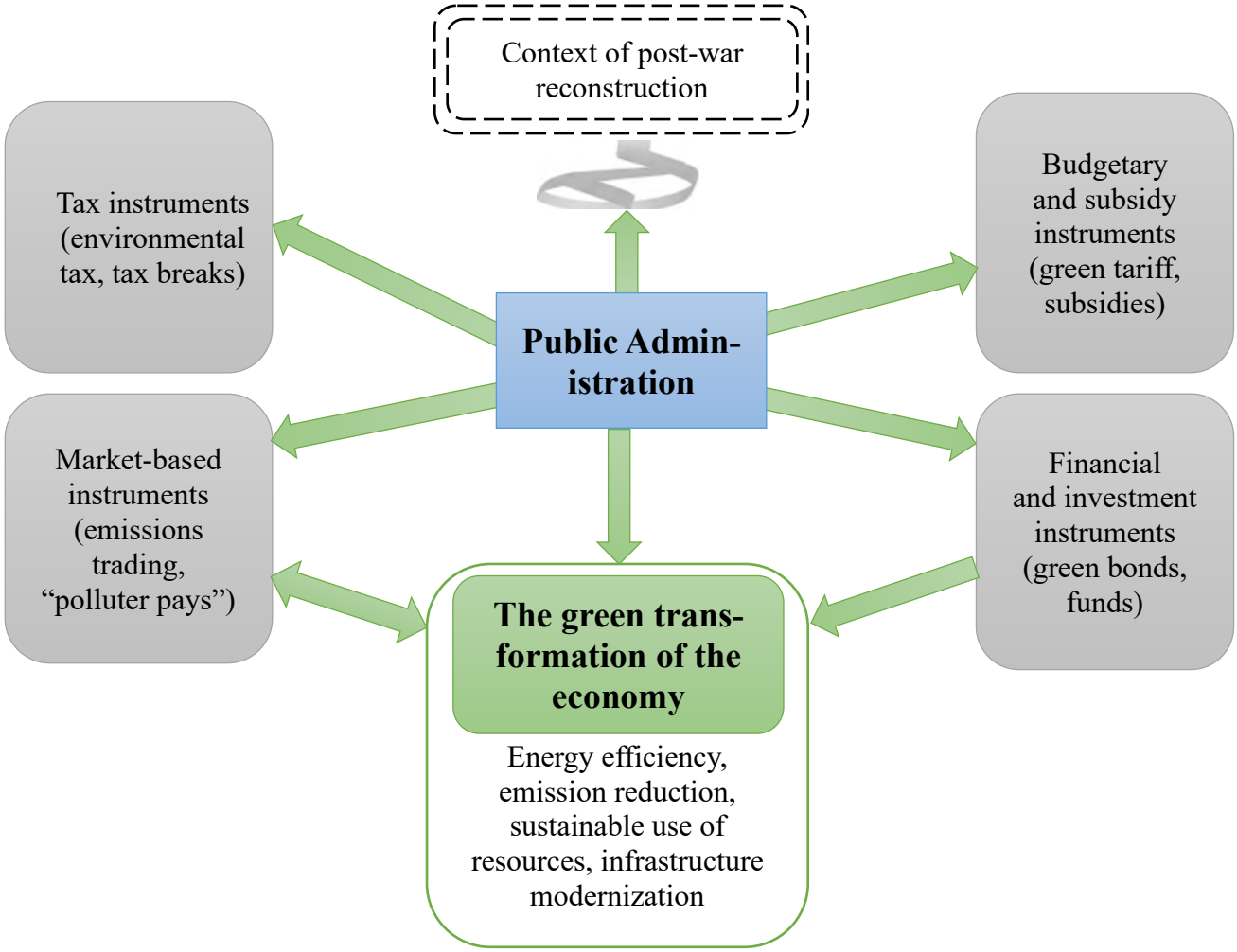


Fig. 1. The operational mechanism of financial and economic instruments for the green transformation in Ukraine's public administration (*Source:* compiled by the author)

investment. Each of the instruments used by the state is a lever of impact that creates economic incentives for businesses and citizens. These incentives, in turn, form financial flows that are directed to the implementation of green technologies and modernization.

The state is a key player in the process of the green transformation due to its unique powers and functions, which can be grouped into three main categories:

- regulatory, which creates and implements the legislative framework regulating environmental standards and norms,
- stimulant, as through financial and economic instruments the state actively encourages desired behavior and also uses various mechanisms to make green solutions economically attractive, and
- investment, when the state can act as a major investor in key infrastructure projects that are too large or risky for private capital [3; 11].

Thus, the state does not simply control, but actively shapes the environment for the green transformation, using its levers to create stable and predictable policies. The private sector and civil society, of course, play a vital role, but it is the state that sets the general vector of movement, creates rules and provides incentives. In this regard, the central block represents the block of state administration, which acts as an entity that forms and implements state policy.

The state administration system creates favorable context for the development of renewable energy, using a systemic approach that involves the interaction of different groups of instruments [13]. In particular, for the effective operation of financial and economic instruments, the state creates a legislative framework that guarantees stable conditions for investment. At the same time, it uses fiscal instruments, for example, by providing tax breaks for the import of equipment for solar power plants. This reduces the cost of projects and makes them more appealing.

To minimize risks for investors and guarantee profitability, the state uses budget and subsidy instruments. In particular, the green tariff is, in fact, a state-guaranteed increased tariff for electricity generated from renewable sources, which guarantees that the investor will receive a fixed, increased price

for the generated electricity over a long period [14]. Such a guarantee reduces risks and makes investments in solar, wind, or biogas plants very attractive. Without this tariff, the private sector would not have sufficient incentives for the large-scale development of renewable energy. At the same time, subsidies are a form of direct state aid. For example, the government can allocate funds for programs that partially offset the costs of home insulation or the purchase of electric vehicles. This reduces the financial burden on citizens and businesses, stimulating them to invest in green technologies.

The use of tax instruments makes the introduction of new technologies more profitable. In particular, tax benefits, profit benefits if a company invests in research and development (R&D) of green technologies, VAT exemptions for environmentally friendly equipment, etc., contribute to the fact that the state reduces the cost of the innovation process, making it more attractive for businesses.

A special mechanism of state support is a guaranteed green tariff. It obliges the state or energy supply companies to purchase electricity generated from renewable sources (sun, wind, biomass) at a fixed, economically justified tariff, which is usually higher than the market rate [7].

The combination of tax breaks and a guaranteed green tariff makes renewable energy projects attractive for investment. In response to these incentives, financial and investment instruments are activated. Investors (both private and international) are more willing to invest, as they see potential profitability and stability. This is manifested in the emission of green bonds or the provision of preferential loans for the construction of plants.

It should be noted that green bonds are an instrument that directly attracts capital. The funds received from their sale are specifically directed to financing environmental projects [16]. For example, a municipality can issue green bonds for the construction of a modern waste processing plant. Investors who buy them know that their money will go to a green cause, which makes this instrument attractive to socially responsible funds and private individuals.

All these interrelated actions create a new market in which market instruments are already operating. Due to the growth of green electricity production, dependence on traditional sources is reduced, and the energy market becomes more competitive.

The operational framework of financial and economic instruments supporting Ukraine's green transformation functions in the special context of the post-war reconstruction. It is worth noting that its effectiveness depends on external factors that affect changes in funding priorities, create threats to investments, but, at the same time, contribute to opportunities for a green leap and expand integration with international partners. In particular, in the context of post-war reconstruction, the state budget and international financial assistance will be directed primarily to critical needs, such as defense, reconstruction of destroyed infrastructure, humanitarian and social programs. This means that financing green projects, although still important, may not be the top priority.

War and associated risks (mine hazard, possible shelling) significantly increase investment risks for private capital. Investors considering projects in renewable energy or energy efficiency will require additional guarantees and insurance, which makes it difficult to attract funds.

At the same time, the destruction of infrastructure creates a unique opportunity not only to restore it, but to modernize it using new, green technologies. Restoration can become a catalyst for a large-scale green transformation if the state creates the right incentives and mechanisms for this [1]. For example, instead of rebuilding old power plants, modern solar or wind power plants that meet European standards can be built on the spot.

Post-war reconstruction is closely linked to the process of integration into the EU. This requires Ukraine to harmonize its legislation with the European Green Deal. Thus, the context of reconstruction forces public administration not only to implement green policies, but to do so taking into account European requirements and standards.

Therefore, post-war reconstruction is not just an external factor, but a defining context that can both complicate and accelerate the green transformation.

The final result of this mechanism is the green transformation of the Ukrainian economy, which is manifested in increased energy efficiency (for example, a 15% reduction in energy consumption in the housing and communal services sector), reduced emissions (in particular, achieving the goals set by the Paris Agreement or alignment with European standards) and sustainable use of natural resources (including increase in waste recycling by 30% and implementing the principles of the circular economy).

As it was shown in the Figure 1, the result is not the final point. Achieving the goals of the green transformation creates a feedback loop with public administration. Successful results can become the basis for developing new, more ambitious strategies, as well as for attracting additional investments. In addition, the green transformation not only improves the environment, but also creates new jobs, improves public health and increases the quality of life. This is also an important final result of the operational mechanism of financial and economic instruments for the green transformation in

Ukraine's public administration.

We believe that assessing the effectiveness of the operational mechanism of financial and economic instruments for the green transformation is an important stage of research. For this, a system of criteria can be used that covers both quantitative and qualitative indicators. They will allow for a comprehensive analysis of how successfully the set goals are achieved.

Some criteria for assessing the effectiveness of the mechanism of financial and economic instruments of the green transformation in Ukraine's public administration are proposed [10, 18-21]. The criteria, indicators and their description are provided in Table 1.

Each of the criteria listed in the table has its own meaning. Thus, economic criteria show how effecttively financial resources are used to achieve green goals. Environmental criteria directly measure the impact of the mechanism on the state of the environment. Social and institutional criteria reflect the impact of the mechanism on society and the efficiency of public administration. The application of these criteria will allow not only to state the fact of the implementation of green policies, but also to objectively assess their efficiency, identify weaknesses and substantiate recommendations for their improvement.

It should be noted that the implementation of the green transformation policy in Ukraine before the full-scale invasion faced a number of fundamental challenges that hindered systemic progress, and this has remained largely unchanged. One of the key issues is the fragmentation of the policy.

Table 1

Criteria for assessing the effectiveness of the mechanism of financial and economic instruments for the green transformation in Ukraine's public administration (*Source:* developed by the author)

Criteria	Indicator	Description
Economic	Amount of investments raised	Measured by the amount of private and foreign capital invested in renewable energy projects, energy efficiency, and other green initiatives
	Cost/result ratio	Shows how much public funds (subsidies, tax breaks) were spent to achieve a certain environmental effect (e.g., reducing emissions by 1 ton)
	Innovation stimulation	Assessed by the number of patents in the field of green technologies, the amount of funding for R&D projects and the share of innovative products in the total volume of production
Environmental	Emission reduction	The main indicator, measured in tons of reduced greenhouse gases (CO_2) emissions and other pollutants
	Increase in the share of renewable energy sources	Measured as a percentage of the total amount of electricity consumed or produced
	Environmental quality improvement	Can be assessed by indicators such as air, water and soil quality in regions where green projects have been implemented
Social and institutional	Job creation	Measured by the number of new jobs created in green sectors of the economy
	Transparency and accountability level	Assessed by the availability and accessibility of public reports on the use of funds allocated for green initiatives
	Compliance with international standards	Evaluated in terms of the compliance of national legislation and policies with EU requirements (e.g. European Green Deal)

It means that instead of a single, coordinated plan, various departments and state bodies work on similar tasks independently of each other. This is manifested in some aspects, in particular:

– the absence of a single management center. There is no single body responsible for coordinating all aspects of the green transformation. For example, the Ministry of Energy of Ukraine may develop a policy on renewable energy sources, and the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine – a policy on waste management, without proper communication between them;

– conflicts of interest – sometimes the interests of different departments do not coincide, and even contradict each other. For example, economic departments may prefer projects that bring quick profits, but have a negative impact on the environment, while environmental departments advocate for stricter restrictions;

– functional overlap, when different authori-

ties may perform similar functions, which leads to inefficient use of resources and slows down decision-making. For example, several ministries (the Ministry of Community and Territorial Development of Ukraine through the State Agency for Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine and the Ministry of Energy of Ukraine) deal with energy efficiency issues;

– weak coordination with local authorities. National strategies are often not properly integrated with plans at the regional and local levels, which complicates their implementation in practice.

This fragmentation not only creates bureaucratic obstacles, but also prevents the formation of a holistic, systemic policy that could effectively promote the transition to a green economy.

At the same time, significant barriers to green projects in Ukraine are corruption risks and bureaucracy, which manifest themselves in several aspects.

First of all, there is opacity and chaos in issuing permits. The permitting system is complex and confusing. Investors often face the need to obtain numerous approvals from different agencies, which creates a risk of abusive practices. Opacity in the decision-making process and the lack of clear deadlines for reviewing documents leads to the fact that projects can be "stuck" for months or even years.

The second aspect is corruption in the distribution of green tariffs and subsidies. The renewable energy support system, known as the green tariff, although designed to stimulate investment, in practice faces corruption risks. This can manifest itself in priority connection to the networks for certain companies, uneven distribution of state support, or the use of "illicit schemes" to obtain subsidies. This situation repels honest investors who do not want to work in such conditions.

Another aspect is bureaucratic inertia and the lack of a single window. The dispersion of functions between different ministries and agencies creates long bureaucratic chains. Investors have to interact with many state structures, each having its own requirements and procedures. The lack of a "single window" mechanism for green projects makes administrative procedures excessively complex, expensive and lengthy, which significantly increases risks and costs for investors.

Overall, the combination of these factors creates an unfavorable investment environment that hinders the development of the green economy in Ukraine, despite its significant potential.

It is important to emphasize the specific challenges of the post-war period. In particular, the full-scale war added new, unprecedented challenges that radically changed the context of the green transformation. The most obvious consequence is the destruction of the infrastructure. The scale of the destruction that Ukraine has suffered is colossal and unprecedented. Russian shelling has destroyed a significant part of the energy, transport and industrial infrastructure. This includes power plants, transformer substations, oil depots, bridges, railways, and factories. The restoration of these facilities requires enormous financial and human resources. In the context of the green transformation, it means that Ukraine has a unique, albeit tragic, opportunity not only to restore what was destroyed, but to rebuild according to the principles of a green economy, i.e. using energy-efficient technologies and renewable energy sources. However, at the initial stage, the priority is to restore vital systems as soon as possible, which does not always allow for the implementation of more expensive and long-term green solutions.

Certainly, the number one priority is the redistribution of budgetary resources to defense and security. After the start of the full-scale invasion, budgetary resources in Ukraine were redistributed to defense and security. This became an absolute priority for the survival of the Ukrainian state. As a result, funding for environmental programs and green initiatives has been significantly reduced. Programs that previously received state subsidies or support have been curtailed or are financed on a residual basis. Accordingly, most green projects that were previously in development or at the implementation stage have been frozen until the situation stabilizes. This creates a serious obstacle to the development of renewable energy, energy efficiency and other environmental areas that largely depend on state support.

Another, no less important, specific challenge of the post-war period for Ukraine is the mine hazard and contamination of territories with ammunition. Vast areas of the country are mined and contaminated with explosives, making the implementation of projects in certain regions difficult or impossible. Until the areas are demined and cleared, construction work cannot begin, agricultural activities cannot be carried out, and infrastructure facilities, including solar and wind power plants, cannot be installed. The mine hazard factor not only threatens people's lives, but also makes large areas unsuitable for economic activity, including green projects. Demining is a complex, expensive, and lengthy process that requires significant efforts from the international community.

Finally, another specific challenge is the change in priorities. The war has radically changed the priorities of both the state and society. Issues of survival, security, and humanitarian aid have come to the fore. The environmental agenda, which was previously actively discussed and developed, has receded into the background. Citizens, businesses, and the government of Ukraine are focused on the daily struggle for survival, rebuilding destroyed cities,

helping displaced people, and supporting the army. While environmental issues remain important in the long run, they are not currently a priority. This shift in focus is leading to a decline in public and political attention to green initiatives, which is also hampering their development.

Despite all the above challenges, Ukraine's post-war reconstruction is not just a need to rebuild what was destroyed, but a unique chance for a green leap. It is an opportunity to modernize the economy on new, sustainable principles, abandoning outdated technologies and practices. Instead of restoring old coal-fired power plants, modern renewable energy facilities that meet European standards can be built. Instead of outdated engineering networks, energy-efficient solutions can be implemented. This approach will allow Ukraine not only to solve the problem of post-war reconstruction, but also to accelerate integration into the EU, since the green transformation is the cornerstone of the European Green Deal [2; 5].

Therefore, public administration in Ukraine is faced with the task of not just responding to challenges, but using them as a catalyst for creating a new, sustainable and competitive economy.

In light of the above, it is believed that improving the mechanism of financial and economic instruments of the green transformation in Ukraine's public administration should be based on a systemic approach. Based on an analysis of the prevailing problems and challenges of the post-war period, a series of recommendations can be formulated to improve policy effectiveness and support conditions conducive to sustainable recovery.

The first recommendation is that the systemic approach improvement should occur by creating a comprehensive strategy that will overcome the above-mentioned challenges, such as, for example, policy fragmentation, functional overlap, etc. Instead of disparate initiatives, a single, coordinated document is needed that will integrate environmental, economic, and social aspects. Moreover, the strategy should contain the following key elements:

– a unified concept and vision – the strategy should clearly define the goals, priorities and timeframes of the green transformation, and take into account both the needs of post-war reconstruction and the requirements of European integration. This will create a common vision for all stakeholders – from government and businesses to the public;

– policy integration – it is necessary to ensure the interconnection between environmental, energy supply, industrial and financial policies (for example, energy efficiency policies should be coordinated with funding programs, and the restoration of industrial facilities should be coordinated with the implementation of green technologies);

– a clear demarcation of powers – the strategy should clearly define the roles and responsibilities of various ministries and departments, which will help avoid functional overlap and increase the efficiency of the state apparatus (for example, the creation of a coordination center or interdepartmental commission can be an effective mechanism for ensuring consistency of actions);

– transparency and accountability – the strategy should include mechanisms for monitoring and evaluating its implementation, as well as ensure the availability of information to the public, which will help reduce corruption risks and increase investor confidence.

Such a systemic approach will allow Ukraine not only to rebuild the destroyed infrastructure, but to do so on a new, more sustainable and environmentally friendly basis. This is not only the path to sustainable development, but also one of the key elements of European integration.

The second recommendation is to reform fiscal policy in Ukraine, especially in the context of the green transformation, which involves the transition to environmental taxation. This approach means changing the focus of the tax system from traditional objects (income, profit) to those that have a negative impact on the environment. The main goal is not only to generate revenue for the budget, but also to economically stimulate environmentally responsible behavior of businesses and citizens.

In order to achieve this, it is necessary to:

– expand the tax base by introducing or increasing taxes on greenhouse gas emissions, water and soil pollution, and the use of non-renewable resources (i.e. increase environmental tax rates or introduce new fees for waste generation);

– stimulate green investments by providing tax incentives for companies that implement energy-efficient technologies, use renewable energy sources or invest in green infrastructure (i.e. income tax breaks or reduced VAT rates for green goods and services may be introduced);

– introduce the "polluter pays" mechanism. This principle is the basis of environmental taxation. It provides that those who cause damage to the environment should bear financial responsibility for it. This stimulates businesses to look for ways to minimize their negative impact;

– create a green fund. Revenues generated from environmental taxes may be channeled into a dedicated fund, the proceeds of which will be used to finance projects on the environment restoration, infrastructure modernization, and green initiatives support.

In the context of post-war reconstruction, fiscal policy reform becomes even more relevant. On the one hand, it can become a source of financing for

the restoration of destroyed infrastructure according to new, green standards. On the other hand, there is a risk of increasing the financial burden on businesses, which can slow down economic recovery. Therefore, the transition should be gradual and balanced. It is important to ensure transparency in the use of funds received, a smooth transition for industrial enterprises, and clear and predictable rules of the game for investors. An effectively reformed fiscal policy can become a powerful tool for accelerating Ukraine's green transformation and its integration into European environmental standards.

The third recommendation emphasizes that attracting private and international investment is crucial for Ukraine's successful post-war reconstruction and green transformation.

Public-private partnership (hereinafter referred to as PPP) is an effective mechanism for attracting private investment for projects that have public value. This allows combining financial resources and experience of the private sector with state guarantees and stability. In the context of the green transformation, PPP can be used for the construction and modernization of renewable energy facilities (solar, wind power plants); creation of modern infrastructure for waste management, including sorting and processing plants; and implementation of energy efficiency projects in the housing and communal sector and public buildings.

In conditions of martial law and high risks, attracting investors requires reliable protection mechanisms. Especially important are state guarantees that can cover part of the investment in case of their loss, and development of insurance instruments against military risks. This may be a special state fund or a program operating in cooperation with international partners and insurance companies. Such mechanisms will give investors confidence in the protection of their capital and will stimulate them to invest in the Ukrainian economy, even with the existing risks.

The market for green bonds also needs to be developed, which is a financial instrument that allows raising funds from a wide range of investors (both institutional and private) to finance projects aimed at protecting the environment and combating climate change. The development of this market in Ukraine will allow diversifying sources of financing for green projects, reducing dependence on budget funds and grants, as well as attracting investors looking for opportunities for sustainable and socially responsible investments.

All these measures taken together will create a favorable investment environment that is the basis for a successful green transformation and sustainable recovery of Ukraine.

The fourth recommendation includes institutional changes aimed at increasing transparency and efficiency of governance and is very important for the success of the green transformation, because even the most effective strategies and financial instruments cannot succeed within an inefficient and corrupt state apparatus.

To overcome corruption and bureaucracy, it is necessary to implement a number of institutional reforms, in particular, digitalization of administrative services (the introduction of electronic platforms and services, such as electronic permits and tenders, will significantly reduce opportunities for corruption, which will make the processes of obtaining permits for green projects faster, more transparent and more accessible); open registers and databases (the creation and publication of open registers of investment projects, financing, public procurement and environmental information will allow the public and business to exercise control); independent monitoring (involving independent auditors and international organizations to monitor the implementation of green projects and the use of public funds will help increase accountability).

To increase the efficiency of management in the field of green transformation in Ukraine, a single coordination center should be created. Instead of disparate ministries competing with each other, a single body is needed that will coordinate all policies in the field of green transformation. This may be a special agency or an interdepartmental commission endowed with relevant powers.

It is also advisable to introduce the principle of a "single window". This mechanism will simplify the interaction of investors and businesses with state authorities, as all necessary documents and permits will be obtained in one place, which will significantly reduce the time and costs of bureaucratic procedures.

At the same time, the development of human resources is considered very effective. Training and attracting qualified specialists in the field of green economy and environmental management is key, as this will allow developing and implementing effective policies that meet international standards.

Such institutional changes are the basis for successful implementation of all other recommendations. They will create a solid foundation on which a sustainable and prosperous green economy of Ukraine can be built.

Conclusions. Thus, improving the mechanism of financial and economic instruments of the green transformation in Ukraine's public administration should be based on a systemic approach. Despite the fact that public administration is a key actor in this process, before and after the full-scale invasion, Ukraine has faced a number of fundamental problems that hinder systemic progress (fragmentation of

policy, insufficient financial support, and weakness of the institutional environment).

The full-scale war added new, unprecedented challenges for Ukraine (destruction of infrastructure, redistribution of budgetary resources, mine hazard and contamination of territories), which radically changed the context of the green transformation. At the same time, the war created a unique chance for a green leap. Post-war recovery provides an opportunity to modernize the economy on new, sustainable principles, abandoning outdated technologies.

Thus, the effective use of financial and economic instruments of green transformation is key to the reconstruction of Ukraine. These measures will not only address pressing problems, but also build a sustainable and competitive economy that meets European standards. It is substantiated that the environmental component of the implementation of the European Green Deal is determined in the policy of sustainable development of Ukraine and includes the following areas of implementation: reducing emissions, increasing the share of renewable energy sources, improving environmental quality.

Further research could focus on the effectiveness of financial instruments in war and recovery situations.

Bibliography

1. *Білокінна І. (2023). Зелена економіка як вимога часу і основа успішної післявоєнної відбудови країни. Вісник Хмельницького національного університету, (2), 79–88. Отримано з https://heraldes.khmnu.edu.ua/index.php/heraldes/article/view/633/646*
2. *Communication from the commission to the European Parliamen. The European Green Deal. Brussels, 11.12.2019.COM/2019/640. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52019DC0640*
3. *Джубак К.М. (2023). Фінансові інструменти розвитку зеленої економіки. Сучасна економіка, 39, 26–32. https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/14847/1/dziubak.pdf*
4. *Дячук А. (2024). Вплив екологічних проєктів на досягнення Цілей сталого розвитку територіальними громадами міст. Вісник Хмельницького національного університету, 3(2), 389–394. https://heraldts.khmnu.edu.ua/index.php/heraldts/article/view/324/314*
5. *European Commission. (2022). The European Green Deal and Ukraine: Pathways to sustainable recovery. Brussels: EU Publications Office.*
6. *Коваленко, Ю. М., & Літвін, Я. А. (2021). Фінансові інструменти, їх класифікації та напрями інноваційних розвідок. Проблеми і перспективи економіки та управління, 1(17), 132–142. http://ppeu.stu.cn.ua/article/view/176593*
7. *Коляда Т. та ін.(2024). Нові цифрові фінансові інструменти: сутність і перспективи використання в реконструкції постраждалих територіальних громад України. Проблеми економіки, 2(60), 247–253. https://surl.li/mkgdgh*
8. *Максименко Н. та ін. (2025). Зелена інфраструктура українських міст в контексті Європейського зеленого курсу. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (62), 437–451. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-33*
9. *Мединська Н. (2022). Економічний механізм природокористування в умовах сучасних викликів: принципи та інституціоналізація. Економіка і суспільство, 38. https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/1284/1238*
10. *Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2023). Financing climate action in Eastern Europe, Caucasus and Central Asia. Paris: OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/2fba1c3b-en*
11. *Осіпова Л. (2025). Модернізація української промисловості в контексті європейської інтеграції в воєнний та післявоєнний період. International Science Journal of Management, Economics & Finance, 4(4), 27–34. https://isg-journal.com/isjmef/article/view/1069/626*
12. *Петраков Я. (2016). Фінансові інструменти: сутність і класифікація. Науковий вісник Полісся, 3(7), 235–241. http://nvp.stu.cn.ua/article/view/84140/79615*
13. *Петрова І. (2024). Досвід реалізації інвестиційних проєктів на засадах партнерства влади, бізнесу та суспільства в Україні. Вісник економічної науки України, 1(46), 61–67. https://nasplib.isofts.kiev.ua/server/api/core/bitstreams/d659b63a-6a90-414f-8243-8fdb36a7118e/content*
14. *Пшибельський В. (2025). Розвиток зеленої економіки на засадах соціальної відповідальності [дис. на здобуття ступеня доктора філософії (PhD): 051 «Економіка»]. Луцьк. https://uacademic.info/ua/document/0825U001299*
15. *Sachs, J. D., Koundouri, P., & Stiglitz, J. E. (2021). Sustainable development in the post-pandemic world: Pathways toward a green economy. Nature Sustainability, 4(9), 761–768. https://doi.org/10.1038/s41893-021-00769-1*
16. *Сакаль О. (2017). Інструменти фінансово-економічного регулювання природокористування в умовах посилення інституційних трансформацій. Економіка і суспільство, 13, 930–937. Отримано з https://economyandsociety.in.ua/journals/13_ukr/157.pdf*
17. *Скорик М. та ін. (2025). Перспективи реалізації цілей сталого розвитку в україні в умовах війни та післявоєнного відновлення. Ефективна економіка, 6. https://www.nayka.com.ua/index.php/ee/article/view/6812*
18. *The 5 Principles of Green Economy. Green Economy Coalition. https://www.greeneconomycoalition.org/news-and-resources/the-5-principles-of-green-economy*

19. United Nations Environment Programme (UNEP). (2022). Green fiscal policy framework: Transforming public finance for environmental sustainability. Nairobi: UNEP.
20. What are the Sustainable Development Goals? UNDP. https://www.undp.org/ukraine/sustainable-development-goals
21. World Bank. (2023). Green recovery and reconstruction in Ukraine: Opportunities for sustainable development. Washington, DC: World Bank.

References

1. Bilokinna I. (2023). Green economy as a requirement of the time and the basis for successful post-war recovery of the country. Bulletin of Khmelnytsky National University. 2: 79-88. https://heraldes.khmnu.edu.ua/index.php/heraldes/article/view/633/646 [in Ukrainian]
2. Communication from the commission to the European Parliamen. The European Green Deal. Brussels, 11.12.2019.COM/2019/640. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52019DC0640
3. Dzyubak K. M. (2023). Financial instruments for the development of a green economy. Modern Economics. 39: 26-32. https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/14847/1/dziubak.pdf [in Ukrainian]
4. Dyachuk A., Efremova O., Mateyuk O., Shevchenko S. (2024). The impact of environmental projects on the achievement of sustainable development goals by urban territorial communities. Bulletin of Khmelnytsky National University. 3(2): 389-394. https://heraldts.khmnu.edu.ua/index.php/heraldts/article/view/324/314 [in Ukrainian]
5. European Commission. (2022). The European Green Deal and Ukraine: Pathways to sustainable recovery. Brussels: EU Publications Office.
6. Kovalenko Yu., Lytvyn Ya. (2021). Financial instruments, their classifications and areas of innovative explorations. Issues of management and development of the region's productive forces. 1(17): 132-142. http://ppeu.stu.cn.ua/article/view/176593 [in Ukrainian]
7. Kolyada T. A., Prozorov Yu. V. (2024). New digital financial instruments: essence and prospects of use in the reconstruction of affected territorial communities of Ukraine. Issues of economics. 2(60): 247-253. https://surl.li/mkgdgh [in Ukrainian]
8. Maksymenko N., Peresadko V., Hrechko A., Burchenko S., Skryhan H. (2025). Green infrastructure of Ukrainian cities in the context of the European Green Deal. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (62), 437-451. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-33 [in Ukrainian]
9. Medynska N. V. (2022). Economic mechanism of nature management in the context of modern challenges: principles and institutionalization. Economy and Society. 38. https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/1284/1238 [in Ukrainian]
10. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2023). Financing climate action in Eastern Europe, Caucasus and Central Asia. Paris: OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/2fba1c3b-en
11. Osipova L. (2025). Modernization of Ukrainian Industry in the Context of European Integration in the War and Post-War Period. International Science Journal of Management, Economics & Finance. 4(4): 27-34. https://isg-journal.com/isjmef/article/view/1069/626 [in Ukrainian]
12. Petrakov Ya. V. (2016). Financial Instruments: Essence and Classification. Scientific Bulletin of Polissya. 3(7): 235-241. http://nvp.stu.cn.ua/article/view/84140/79615 [in Ukrainian]
13. Petrova I. (2024). Experience in implementing investment projects based on the principles of partnership between government, business and society in Ukraine. Bulletin of Economic Science of Ukraine. 1(46): 61-67. https://nasplib.isofts.kiev.ua/server/api/core/bitstreams/d659b63a-6a90-414f-8243-8fdb36a7118e/content [in Ukrainian]
14. Pshybelskyi V. V. (2025). Development of a green economy based on social responsibility: dissertation for the degree of Doctor of Philosophy: 051 "Economics" (05 - Social and Behavioral Sciences). Lutsk, 276. https://uacademic.info/ua/document/0825U001299 [in Ukrainian]
15. Sachs, J. D., Koundouri, P., & Stiglitz, J. E. (2021). Sustainable development in the post-pandemic world: Pathways toward a green economy. Nature Sustainability, 4(9), 761–768. https://doi.org/10.1038/s41893-021-00769-1
16. Sakal O. V. (2017). Instruments of financial and economic regulation of nature use in the context of deepening institutional transformations. 2017. Economy and Society. 13: 930-937. https://economyandsociety.in.ua/journals/13_ukr/157.pdf [in Ukrainian]
17. Skoryk M. O., Agafontseva A. A. (2025). Post-war restoration of the Ukrainian economy on the basis of the green transformation. Grail of Science: International Scientific Journal. 52: 351-360. [in Ukrainian]
18. The 5 Principles of Green Economy. Green Economy Coalition. https://www.greeneconomycoalition.org/news-and-resources/the-5-principles-of-green-economy
19. United Nations Environment Programme (UNEP). (2022). Green fiscal policy framework: Transforming public finance for environmental sustainability. Nairobi: UNEP.
20. What are the Sustainable Development Goals? UNDP. https://www.undp.org/ukraine/sustainable-development-goals
21. World Bank. (2023). Green recovery and reconstruction in Ukraine: Opportunities for sustainable development. Washington, DC: World Bank.

Економічні, екологічні та соціальні виміри зеленої трансформації в Україні: аспекти управління в умовах війни та повоєнної відбудови

Максим Хожило
к. тех. н., докторант Національного технічного університету
«Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

Метою статті є аналіз та оцінка ефективності існуючих фінансово-економічних інструментів зеленої трансформації в державному управлінні України, а також обґрунтування потреб у вдосконаленні окремих сфер у контексті післявоєнної відбудови. Дослідження базується на системному та порівняльному аналізі нормативно-правової бази, політичних документів та статистичних даних, пов'язаних із зеленою трансформацією України. Для виявлення перешкод для ефективного впровадження політики було використано якісні та аналітичні методи, тоді як порівняльна оцінка дозволила оцінити механізми України в контексті екологічної та фіскальної практики ЄС. Дослідження також включає експертні оцінки та вторинні дані міжнародних організацій, таких як ОЕСР, Світовий банк та ЮНЕП. Результати дослідження. Аналіз виявив кілька структурних бар'єрів, що перешкоджають ефективності фінансово-економічних інструментів для зеленого переходу. До них належать фрагментація політики, відсутність інтегрованої національної стратегії, дублювання відомчих функцій та високі корупційні ризики. Вплив повномасштабної війни суттєво змінив пріоритети державного управління, перенаправивши фіскальні ресурси на оборону, збільшивши руйнування інфраструктури та уповільнивши зелені інвестиції. Тим не менш, період післявоєнного відновлення надає можливості для інтеграції принципів сталого розвитку в процес відбудови. Ключові принципи досягнення цілей сталого розвитку визначаються економічною, екологічною та соціальною складовими. Встановлено критерії їх вимірювання: економічні критерії показують, наскільки ефективно використовуються фінансові ресурси для досягнення зелених цілей. Екологічні критерії безпосередньо вимірюють вплив механізму на стан навколишнього середовища. Соціальні та інституційні критерії відображають вплив механізму на суспільство та ефективність державного управління. Застосування цих критеріїв дозволить не лише констатувати факт реалізації зеленої політики, але й об'єктивно оцінити її ефективність, виявити слабкі сторони та обґрунтувати рекомендації щодо її вдосконалення.У дослідженні робиться висновок, що післявоєнне відновлення України є унікальною можливістю для «зеленого стрибка», що дозволяє структурну модернізацію національної економіки відповідно до принципів сталого розвитку. Ефективне впровадження фіскальних та інституційних реформ у поєднанні з підвищеною прозорістю та публічною підзвітністю може пришвидшити інтеграцію України до Європейського зеленого курсу та глобальних структур сталого розвитку.

Ключові слова*: зелена трансформація, екологічна політика, Європейський зелений курс, економічні механізми, державне управління, сталий розвиток, інвестиційна політика, інституційні зміни, післявоєнне відновлення, навколишнє середовище.*

Надійшла 2 жовтня 2025 р.
Прийнята 4 листопада 2025 р.

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-35
UDC 911.53:712.253(477.46)
Received 15 April 2025
Accepted 2 June 2025

Restored and modern landscape structures of the Synytsky Park in Cherkasy region

Yurii Yatsentiuk [1]
DSc (Geography), Professor, Department of Geography,
[1] Vinnytsia Mykhailo Kotsiubynskyi State Pedagogical University, Vinnytsia, Ukraine,
e-mail: yatsentuky@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-2906-4828;
Volodymyr Volovyk [1]
DSc (Geography), Professor, Department of Geography,
e-mail: wolowyk@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8663-0342;
Olena Mishchenko [2]
DSc (Geography), Associate Professor, Department of Physical Geography,
[2] Lesya Ukrainka Volyn National University, Lutsk, Ukraine,
e-mail: mischenko.olena@vnu.edu.ua, https://orcid.org/0000-0002-6801-7197;
Svitlana Hryshko [3]
PhD (Geography), Associate Professor, Department of Geography and Tourism,
[3] Bogdan Khmelnitsky Melitopol State Pedagogical University, Zaporizhzhia, Ukraine,
e-mail: gryshko245@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-5054-3893;
Iryna Kravtsova [4]
DSc (Geography), Associate Professor, Department of Ecology and Life Safety,
[4] Uman National University of Horticulture, Uman, Ukraine,
e-mail: irinakravzova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3431-473X

ABSTRACT

Problem statement. In the conditions of increasing anthropogenic environment, loss of biodiversity, important problems are the preservation of quasi-natural areas and the rational design of landscape complexes. An important role in this regard is played by parks-monuments of garden and park art. The organic combination of their nature conservation and recreational functions requires knowledge about the landscape complexes of the territory. The park-monument of garden and park art of local importance "Synytsky Park" (hereinafter - Synytsky Park) was founded in the 18th century. In 2023 it was included in the State Register of Immovable Monuments of Ukraine as an object of cultural heritage of national importance. However, a significant number of park's cultural monuments have been destroyed or have undergone negative changes. Its restoration and further development require knowledge about landscapes that existed here before the park was founded (restored) and exist today (modern).

Purpose. The purpose of the article is to identify the features of the landscape complexes of the Synytsky Park.

Methods. To achieve the purpose, landscape studies of the territory were conducted, revealing the features of the restored (middle of the 18th century) and modern landscape structure of the park. The research was conducted using the following methods: field expeditionary continuous survey (to identify the features of the modern landscape structure); analytical and cartographic analysis (in the process of analyzing existing maps of nature, economy, anthropogenic changes in landscapes); geoinformation methods - QGIS software (to create maps of natural (reconstruction) and modern landscapes).

Results and Discussion. The slope terrains dominated and still dominate (44.17 %) both in the restored and in the modern landscape structures of the Synytsky Park. The flat interfluve terrains occupied 40.4 %, the flood-plain terrains – 14.71 %, the channel terrains – 0.72 %. In the restored landscape structure of the park dominated (39.11%) the tracts of slightly undulating loess surfaces with dark gray podzolic soils under hornbeam oak forests. The landscape structure of the modern territory of the Synytsky Park has become significantly diversified and complicated. Based on 14 types of natural tracts 44 types of anthropogenic tracts have been formed and are currently distinguished. The most common (34.46 %) tracts in the modern landscape structure of the park are slightly undulating loess surfaces with dark gray podzolic soils under ash forest of the flat interfluve terrains. The area of the channel terrains in the Synytsky Park has decreased by half compared to the middle of the 18th century. Due to the flooding of the dominant part of the river flood-plains by pond waters, the flood-plain type of terrains has transformed into a pond-flood-plain type.

Scientific novelty. The features of the restored landscape structure of the Synytsky Park were identified for the first time. The features of the anthropogenic transformation of types of terrains and tracts of the park from the middle of the 18th century to the present day were identified.

Practical significance. The research results will become a scientific basis for the further development and optimization of the landscapes of Synytsky Park.

Keywords*: Synytsky Park, landscape structure, terrain, tract, sustainable community development, preservation of ecosystems, rational use of natural resources, hornbeam forest, natural heritage, cultural heritage.*

In cites: Yatsentiuk Yurii, Volovyk Volodymyr, Mishchenko Olena, Hryshko Svitlana, Kravtsova Iryna (2025). Restored and modern landscape structures of the Synytsky Park in Cherkasy region. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 479-493. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-35

© Yatsentiuk Yurii, Volovyk Volodymyr, Mishchenko Olena, Hryshko Svitlana, Kravtsova Iryna, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Introduction

In the conditions of increasing anthropogenic environment, loss of biodiversity, global warming, important problems are the preservation of quasi-natural areas on the earth's surface and the rational design of landscape complexes. In order to preserve nature, nature reserves and territories are created. One of the categories of the nature reserve fund is park-monument of garden and park art. They are simultaneously nature conservation and recreational institutions. The organic combination of their nature conservation and recreational functions requires knowledge about the landscape complexes of the territory.

Synytsky Park is located in the western part of the village Sinytsia, in the Palanka rural territorial community of the Uman district of the Cherkasy region (Fig. 1) and occupies an area of 46.0004 hectares [12].

The park was founded in the last quarter of the 18th century. By the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated July 7, 2023 No. 693, it was included in the State Register of Immovable Monuments of Ukraine as an object of cultural heritage of national importance. However, the park has been neglected for many decades, and a significant number of cultural monuments have been destroyed or have undergone negative changes. Currently, the local community is striving to revitalize Synytsky Park. Its restoration and further development require knowledge about the landscapes that existed here before the park was founded (restored) and exist today (modern).

Analysis of recent research and publications. Highlighting previously unresolved parts of the overall problem. The first description of the flora of the Synytsky Park was made by I. V. Tkachuk in 1965 [14]. S. V. Sovhira, G. E. Goncharenko, S. L. Grabovska and R. V. Podzerei identified the general features of the park's vegetation [13].

A. A. Kuzemko and co-authors described 15 biotopes, including 9 natural and 6 anthropogenic [11]. A. I. Kovtonyuk and co-authors studied the composition of the spontaneous flora of the park, determined the indices of the state of transformation of the synanthropic fraction of the flora [5]. O. I. Shynder, Y. V. Yatsentyuk, G. A. Chorna and T. M. Kostruba conducted a tax inventory of tree plantations, studied the spontaneous flora, and identified the features of its geographical, biomorphological, and ecological-coenotic structures [15].

I. V. Kravtsova identified general features of modern landscapes of the Synytsky Park at the level of types of terrains and tracts. However, the names of the tracts don’t indicate the characteristics of the soils, and the vegetation is described too generally (coniferous or deciduous species, mixed forest vegetation) [6-8].

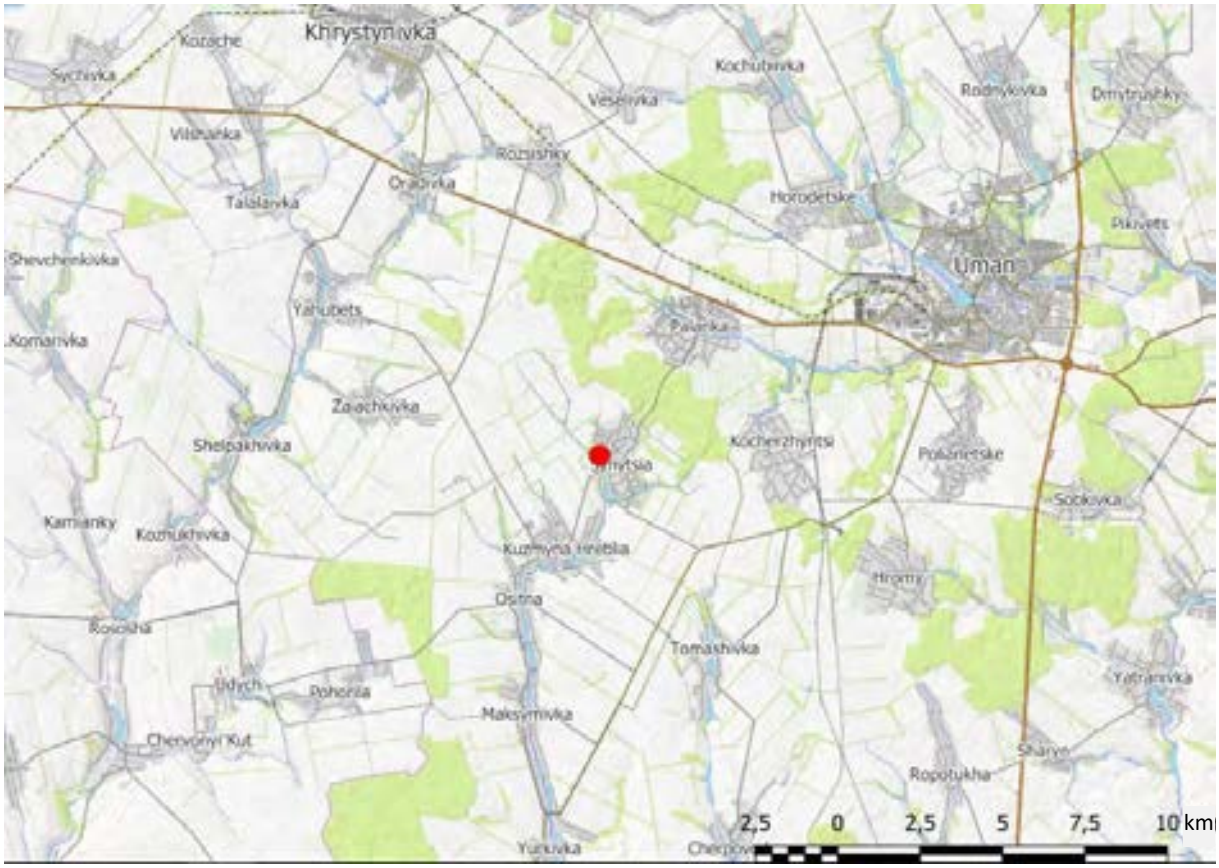


Fig. 1. The location of Synytsky Park (depicted with a red punch)

So, at present, no features of the restored landscape structure of the Synytsky Park have been identified, the modern landscape structure of the park has been described rather superficially and not sufficiently fully and accurately. Therefore, there is a need to conduct landscape studies of this territory. They were conducted by us during 2023-2024, but have not been published so far.

Formulation of the purpose of the article. The purpose of the article is to identify the features of the landscape complexes of the Synytsky Park. To achieve this purpose, landscape studies of the territory were conducted, and the features of the restored (by the middle of the 18th century) and modern landscape structure of the park were identified.

The research was conducted using the following **methods:** field expeditionary continuous survey (to identify the features of the modern landscape structure); analytical and cartographic analysis (in the process of analysing existing maps of nature, economy, anthropogenic changes in landscapes); analysis of literary sources (to identify existing experience in studying landscape complexes of the park, reconstruction of the natural landscape structure of the territory); geoinformation methods – QGIS software, version 3.28.8 (to create maps of natural (reconstruction) and modern landscapes); measurements (to determine the areas of terrains and tracts).

Results and Discussion. From a landscape science point of view, the territory of the Synytsky Park is located within the loess uplands, dissected by ravines and balkas, cut into crystalline rocks with dark gray podzolic soils and podzolic chernozems, with hornbeam oak forests in the past [10, p. 222-223].

Typical are forest-steppe landscape complexes, which are an organic combination of forest areas with meadow-steppe. However, meadow steppes were absent in the park. Instead, the hornbeam forests with dark gray podzolic soils and podzolic chernozems were background.

The landscape complexes of terrestrial and amphibious variants were widespread in natural conditions on the territory of Synytsky Park. The overwhelming majority of the park's natural landscapes belonged to the terrestrial variant.

Slope terrains prevailed and still prevail both in the restored and in the modern landscape structures of the park. They occupy an area of 20.32 ha (44.17 % of the park area). Slightly smaller areas (18.58 ha or 40.4 % of the park area) are occupied by flat interfluve terrains. 14.71 % (6.77 ha) of the territory of the Synytsky Park is occupied by flood-plain terrains. Together, all of the above types of terrains are terrestrial landscape complexes. The smallest areas (0.33 ha or 0.72 % of the park area) in the restored landscape structure were occupied by channel terrains (Fig. 2). They belong to amphibian landscape complexes.

Within the predominantly slope type of terrain, the following types of natural tracts have formed:

- balka with dark gray podzolic soils under hornbeam oak forests;
- gentle (steepness 3°–5°) loess surfaces

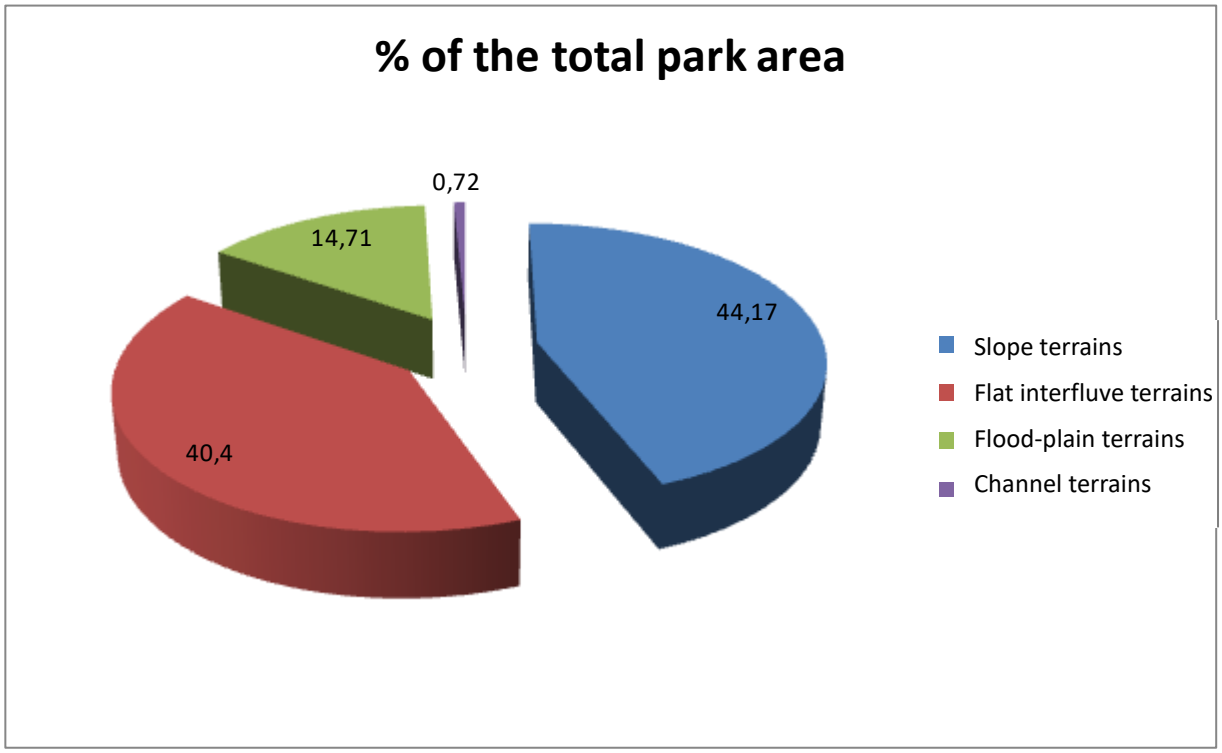


Fig. 2. Restored (by the middle of the 18th century) landscape structure at the level of types of terrains of the Synytsky Park

with podzolic chernozems under hornbeam oak forests;

- slope (steepness 5° – 8°) loess surfaces with podzolic chernozems under hornbeam oak forests;
- steep (with a slope of over 8^0) loess surfaces with podzolic chernozems under hornbeam oak forests;

gentle (steepness 3° – 5°) loess surfaces with dark gray podzolic soils under hornbeam oak forests;

- slope (steepness 5° – 8°) loess surfaces with dark gray podzolic soils under hornbeam oak forests;
- steep (with a slope of more than 8°) loess surfaces with dark gray podzolic soils under hornbeam oak forests (Fig. 3).

Two areas with the tracts of gentle (steepness 3° – 5°) loess surfaces with dark gray podzolic soils under hornbeam oak forests were discovered in the natural landscape structure. They were located in the right-bank part of the Synytsky Park and formed strips. One of the areas was located in the north-western part of the park, in blocks No. 2, 5, 6 and 11. The second area was located mainly in the central part, and also partially covered the northern, eastern and south-eastern parts of the park (blocks

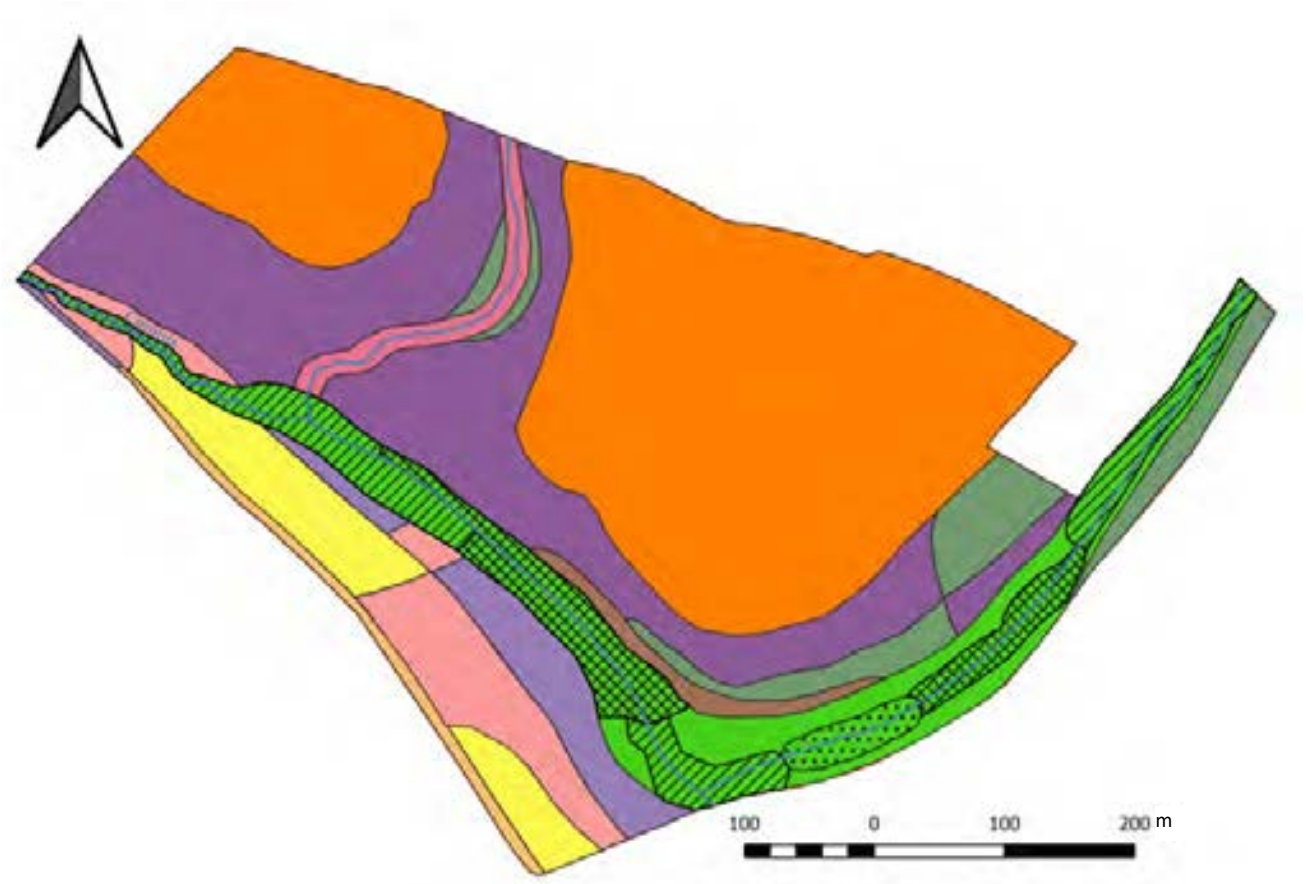
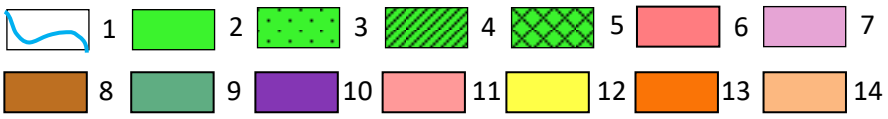


Fig. 3. Reconstruction (middle of the 18th century) of the landscapes of Synytsky Park



1 – Channel type of terrain.
Flood-plain type of terrain. Tracts: 2 – flood-plain meadows; 3 – lowland swamps; 4 – alder groves; 5 – willow groves.

Slope type of terrain. Tracts: 6 - balka with dark gray podzolic soils under hornbeam oak forests; 7 - steep (with a slope of over 8^0) loess surfaces with podzolic chernozems under hornbeam oak forests; 8 - steep (with a slope of more than 8°) loess surfaces with dark gray podzolic soils under hornbeam oak forests; 9 - slope (steepness 5° - 8°) loess surfaces with dark gray podzolic soils under hornbeam oak forests; 10 - gentle (steepness 3° - 5°) loess surfaces with dark gray podzolic soils under hornbeam oak forests; 11 - slope (steepness 5° - 8°) loess surfaces with podzolic chernozems under hornbeam oak forests; 12 - gentle (steepness 3° - 5°) loess surfaces with podzolic chernozems under hornbeam oak forests.

Flat interfluve type of terrain. Tracts: 13 - slightly undulating loess surfaces with dark gray podzolic soils under hornbeam oak forests; 14 - flat loess surfaces with podzolic chernozems under hornbeam oak forests.

No. 2, 6 – 9).

The tracts of gentle (steepness 3° - 5°) loess surfaces with dark gray podzolic soils under hornbeam oak forests dominated in the landscape structure of the slope terrains in the past. These tracts occupied an area of 10.31 hectares (22.4 % of the modern territory of the Synytsky Park and 50.74 % of the slope terrains).

In addition to the background facies of slope surfaces (with a steepness of 3°–5°) with dark gray podzolic soils under hornbeam oak forests, there were also facies of slope surfaces (with a steepness of 3°–5°) with gray podzolic soils under hornbeam oak forests, as well as facies of slope surfaces (with a steepness of 3°–5°) with meadows of various grasses on dark gray podzolic soils in the structure of this type tracts before anthropogenic transformation.

The tracts of slope (steepness 5° - 8°) loess surfaces with dark gray podzolic soils under hornbeam oak forests occupied an area of 2.61 hectares. This is 5.7 % of the territory of the Synytsky Park and 12.84 % of the slope terrains. There were four parts of these tracts. The largest part was located in blocks No. 8 and 9. Its area was 1.64 hectares. Most of these tracts were located in block No. 9.

The second largest part (0.65 ha) was located in the block No. 9, on the left bank of the left tributary of the Synytsia River. Two more parts, each measuring 0.16 ha, stretched in the balka, on both banks of the dry brook, in blocks No. 2 and 6.

The tracts of slope (steepness 5° - 8°) loess surfaces with podzolic chernozems under hornbeam oak forests were formed in blocks No. 10, 11 and 12 and occupied a total area of 2.43 hectares. This is 5.3 % of the territory of Synytsky Park and 11.96% of the slope areas. There were four sections of these tracts in the park. The largest section was located in block No. 12 and occupied an area of 1.78 hectares. Three more sections were located in block No. 11. The largest of them (0.34 hectares) was located along the left bank of the Synytsia River. Two more sections were located on the right bank of this river: one - with an area of 0.16 hectares – was located in the western part of the park, the second - with an area of 0.15 hectares - in its south-western part. The latter partially covered block No. 10.

The tracts of gentle (steepness 3° – 5°) loess surfaces with podzolic chernozems under hornbeam oak forests were also formed in blocks No. 11 and 12 and occupied a total area of 2.38 hectares. This is 5.2 % of the territory of the Synytsky Park and 11.71 % of the slope terrains. There were two sections of these tracts. The largest (1.67 ha) was located in block No. 11, in the south-western part of Synytsky Park. The second section was located in block No. 12, in the south of the park. Its area was 0.71 hectares.

In addition to the dominant facies of gentle (steepness 3°–5°) loess surfaces with podzolic chernozems under hornbeam oak forests in the past, facies of slope (steepness 5°–8°) loess surfaces with podzolic chernozems under hornbeam oak forests were also widespread in the structure of the tracts of gentle (steepness 3°–5°) loess surfaces with podzolic chernozems under hornbeam oak forests.

The tracts of steep (with a steepness of over 8°) loess surfaces with podzolic chernozems under hornbeam oak forests were formed on the right bank of the Synytsia River, in blocks No. 10, 11 and 12. They occupied a total area of 1.71 hectares (3.72 % of the modern area of Synytsky Park and 8.42 % of the slope terrains).

Three parts of this type of tract were identified. Two parts were located in block No.11. The smallest part (0.07 ha) occupied the western part of the Synytsky Park, between its modern border and the path. The second area (0.23 ha) was located in the south-western part of the park. In addition to block No. 11, it included part of block No. 10, that is now under the waters of the pond. The third part was the largest, occupying an area of 1.41 ha. It was located in blocks No. 10 and 12, between the Synytsia River and the path. Part of this area is now also under the waters of the pond.

The tract of steep (with a steepness of over 8°) loess surfaces with dark gray podzolic soils under hornbeam oak forests was formed in blocks No. 8, 9 and 10. It was represented by one part and occupied an area of 0.55 ha. This tract stretched in a narrow strip on the left bank of the Synytsia River and on the right bank of its left tributary. In addition to the dominant facies of steep slopes (with a steepness of over 8°) with dark gray podzolic soils under hornbeam oak forests, facies of gentle slopes (with a steepness of 3° – 5°) with dark gray podzolic soils under hornbeam oak forests were widespread here.

The tract of balka with dark gray podzolic soils under hornbeam oak forests stretched in a narrow strip in blocks No. 2, 6, 11 and occupied an area of 0.84 ha. Its landscape structure in the past represented facies of gentle (steepness 3° – 5°) slopes with dark gray podzolic soils under hornbeam oak forests; steep (steepness 5° – 8°) slopes with dark gray podzolic soils under hornbeam oak forests.

Two types of tracts were formed in the structure of the flat interfluve terrains: flat loess surfaces with podzolic chernozems under hornbeam oak forests and slightly undulating loess surfaces with dark gray podzolic soils under hornbeam oak forests. The latter prevailed and occupied an area of 17.99 hectares (39.11 % of the park area and 96.82 % of flat interfluve terrains).

There were two large tracts of slightly undulat-

ing loess surfaces with dark gray podzolic soils under hornbeam oak forests. The largest tract (14.12 hectares or 78.49 % of the total area of these tracts in the park) was located in the northern, north-eastern and central parts of the Synytsky Park. It occupied the entire blocks No. 3, 4, 7, the eastern parts of blocks No. 2 and 6, most of block No. 8, the north-western part of block No. 9. The second section of this type of tract was formed in the north-western part of Synytsky Park. It occupied the entire block No. 1, the western part of block No. 2, the northern and north-western parts of block No. 5. The area of this section is 3.87 hectares.

The following types of facies were common in the landscape structure of this type of tract in the past: elevated, relatively flat loess surfaces with light gray podzolic soils under hornbeam oak forests; slightly inclined, lowered loess surfaces with dark gray podzolic soils under hornbeam oak forests; slightly inclined loess surfaces with gray podzolic soils under hornbeam oak forests; slightly inclined, loess surfaces with dark gray podzolic soils under meadows with grassy vegetation.

The tract of flat loess surfaces with podzolic chernozems under hornbeam oak forests occupied a narrow strip extending along the modern border of the Synytsky Park, in its southern and south-western parts, in blocks No. 11 and 12. The area of this tract is 0.59 hectares.

The following types of natural tracts were widespread in the structure of flood-plain terrains in the past: alder groves, willow groves, flood-plain meadows, lowland swamps. The alder tracts occupied the largest areas in the structure of flood-plain terrains (2.73 hectares or 40.32 % of the park's river flood-plains and 5.93 % of its territory) in the past.

Three plots of these tracts were formed in the Synytsky Park. The largest plot of alders with an area of 1.37 hectares (50.18 % of the territory of this type of tract) was located in the western and south-western parts of the park, in blocks No. 10 and 11. The second plot of alders with an area of 0.66 hectares (24.18 % of the territory of this type of tract) was located in the southern part of the Synytsky Park, in block No. 10. The third alder tract covered an area of 0.70 ha (25.64 % of the territory of this type of tract). It was located in the north-eastern part of the park, occupying block No. 9 and, partially, No. 10. Facies of flat areas of flood-plains with thickets of *Alnus glutinosa*; elevated areas of flood-plains with meadow soils under meadow, grassy vegetation; coastal areas of flood-plains with thickets of *Salix alba* distinguished in the structure of the alder tracts.

The willow tracts were widespread at the bottom of the current pond, in block No. 10 in the past. They occupied an area of 1.97 ha, i.e. 29.1 % of all flood-plain terrains of the Synytsky Park and 4.28 % of its territory. There were two areas of willow tracts in the park. One of them was located in the southern part of the Synytsky Park and occupied an area of 1.36 ha (69.04 % of this type of tract). The second area was located in the eastern part of the park and occupied of 0.61 ha (30.96 % of this type of tract). The facies of coastal flood-plain areas with thickets of *Salix alba*; lowered, waterlogged flood-plain areas with thickets of *Typha angustifolia* were widespread in the landscape structure of the willow tracts [20].

Flood-plain meadow tracts were widespread in the eastern, south-eastern, and southern parts of the Synytsky Park, at the bottom of the current pond. They are now flooded by the pond's waters. The area of flood-plain meadows was 1.61 hectares, or 23.78 % of all flood-plain terrains of the park and 3.5 % of its territory.

There were three sections of flood-plain meadows within the studied territory. One of them was located on the right bank of the left tributary of the Synytsia River, the second – on the left bank of this tributary, the third – on the right bank of the Synytsia River, in its mouth area. The facies of elevated sections of flood-plains with meadow soils under insufficiently moistened herbaceous communities and facies of lowered sections of flood-plains with meadow soils under overmoistened meadow phytocenoses were widespread in the landscape structure of this type of tracts.

The tract of lowland marsh was located in the south-eastern part of the Synytsky Park. Now it is flooded by the waters of the pond. The area of the tract was 0.46 hectares (6.79 % of the flood-plain terrains of the park and 1 % of the area of the entire park). The structure of the lowland marsh tract included the following facies: thickets of *Carex*; thickets of *Typha angustifolia*; thickets of *Phragmites australis*.

Natural aquatic complexes of amphibian landscapes are distinguished in the structure of river beds similar to tracts and complex tracts of terrestrial landscapes. The channel type of terrains is represented by the aquatic complexes of the Synytsia River and its two left tributaries. They together occupied 0.33 ha or 0.72 % of the park's territory. The total length of rivers within the park before anthropogenic transformation was 2.07 km.

Two types of aquatic areas are distinguished in the river beds: pools and fords. They are paragenetic aquatic complexes that alternate with each other from the source to the river mouth and differ in depth and flow speed, composition of bottom sediments, floristic and faunal composition [16].

Within the boundaries of the Synytsky Park, there were mainly pools in the past. The remains of

fords were found only on the left tributary of the Synytsia River, which previously flowed on the bottom of the balka. Pools are the deepest aquatic sections of rivers between fords. They are characterized by greater depths, lower flow velocity, silty or silty-clay bottom, water stratification by temperature and quantitative indicators of the development of hydrobionts [2, p. 47].

There are distinguished 3 types of aquatic tracts in the landscape structure of the pools: central deep water, central shallow water and coastal shallows [9, p. 97]. The width of the pools sections within the Synytsky Park ranged from one to three meters. Therefore, only aquatic tracts of central deep water and coastal shallows were distinguished in the studied area. They alternated on different banks depending on which bank the river washes, because the latter meanders. In one place, the river washes the left bank. Therefore, central deep water was formed near it and in the central part, and a coastal shallow on the opposite bank. Downstream, the river washes the right bank. As a result, central deep water was formed near it and in the central part, and a coastal shallow on the opposite bank. And this situation is repeated due to the migration of rivers.

The fords are characterized by shallow depths, a rocky-gravel bottom, and a fast and turbulent current. There are 5 types of natural aquatic tracts distinguished in their landscape structure: islands, rapids, central channel, shallow channels and branches, and bays [9, p. 44]. The tracts of islands, central channel, shallow channels and branches were widespread within the boundaries of the Synytsky Park in the past. The ford was probably only on the left tributary of the Synytsia River, which flows on the bottom of the balka. We discovered the remains of such an aquatic area in block No. 2. Here, there were tracts of an island, central channel, and shallow channel.

Today, the landscape complexes of the Synytsky Park are used for the purpose of nature protection as a part of the nature reserve fund of Ukraine. At the same time, as a garden and park complex, the territory is used for recreation of the population.

The landscapes of the park have been greatly transformed due to ancient human economic development. The integral index of anthropogenic landscape change ranges from 6.51 to 7.40 [1]. The percentage of areas of natural elements (forests, swamps, meadows, flood-plains, balkas, etc.) of the south-western part of Cherkasy region is lower than average (21–30 %) [4, p. 28]. However, directly within the boundaries of the Synytsky Park, this indicator is high. Natural elements occupy about 78 %.

Synytsky Park was created precisely as a cultural landscape. It is a valuable garden and park landscape. A necessary condition for its normal functioning and preservation is constant care for it, rational management of regulated nature use. However, this territory fell into decline and overgrown. This was due to the cessation of human care of the park at different periods of its existence and, especially, due to the destruction of buildings, structures and communications.

Recently, through the efforts of the local community, Synytsky Park has been gradually improved. Paths have been restored, emergency trees have been cut down and fallen trees have been removed, thickets have been cleared, garbage has been removed, a playground has been created, benches, bins and signs for tourist attractions have been installed, and the road has been blocked with traffic restrictions to prevent unauthorized removal of wood from the park. As a result, the landscapes of Synytsky Park are becoming more and more "cultural", and the park is gradually becoming a place to meet the cultural needs of the population (and not only local people).

The economic development of the park territory has led to the formation of its modern landscapes (Fig. 4). The most common tracts in the modern landscape structure of the Synytsky Park are slightly undulating loess surfaces with dark gray podzolic soils under ash forest of the flat interfluve terrains. They occupy an area of 15.85 ha (34.46 % of the park area). *Fraxinus excelsior, Ulmus glabra, Acer platanoides, Acer negundo, Acer campestre***,** *Tilia cordata, Carpinus betulus* grow here. There are isolated specimens of such trees: *Picea obovata, Larix sibirica, Pinus sylvestris, Acer pseudoplatanus.*

Two sections of these tracts are distinguished. The smallest in area (3.88 ha) is located in the north-western part of the park, occupying the entire block No. 1, the western part of block No. 2, and most of block No. 5. Within its boundaries, the following facies are distinguished: hills made of a mixture of loess loam and soil, 1 - 1.5 m high, 1.5 - 2 m in diameter, covered with meadow vegetation; bulwark 1 - 1.5 m high, 1 - 1.4 m wide, 18 m long, without vegetation. The second section with an area of 11.97 hectares occupies parts of blocks No. 2 - 4, 6 - 9. In the structure of this section, in the north of block No. 3, a facies of overgrown fruit plantations of *Cornus mas* and *Malus domestica* is distinguished; in block No. 4, facies of pits 0.5 - 1 m deep, 1 - 1.7 m in diameter in loess loams, under grassy vegetation, facies of a ditch 0.3 - 0.5 m deep, 0.5 - 1 m wide and a bulwark 0.2 - 0.4 m high, 0.5 - 0.8 m wide without vegetation are distinguished.

Tracts of slightly undulating loess surfaces with dark gray podzolic soils under thickets of shrubs and undergrowth of forest species were formed in block No. 4 and occupy an area of 0.8 hectares (Fig. 4). *Fraxinus excelsior***,** *Acer platanoides, Acer campestre,*



Fig. 4. Modern landscapes of Synytsky Park:

Channel type of terrain. Tracts: 1 – drying river beds with a muddy bottom, littered with branches and remnants of tree trunks, which is overgrown with grassy vegetation.

Pond-flood-plain type of terrain. Tracts: 2 - pond with an average depth of 0.9 - 1.1 meters with a muddy bottom; 3 - island 51 m long, 17 - 41 m wide , 1 - 1.1 m high, composed of loess loams, with sparse park trees, young plantings of ornamental shrubs and perennial grasses; 4 - swampy island 71 m long, 6 - 17 m wide , 1 - 1.3 m high, composed of loess loams, under alder; 5 - swampy island 54 m long, 12 - 28 m wide , 0.8 - 1.1 m high, composed of loess loams, under willow; 6 - leveled, overmoistened alluvial surfaces with meadow soils under alder; 7 - leveled, swampy alluvial surfaces with bog soils under alder; 8 - leveled alluvial surfaces with meadow soils under willow; 9 - leveled, overmoistened alluvial surfaces with meadow soils under flood-plain meadows.

Slope type of terrain. Tracts: 10 - balka with dark gray podzolic soils under an ash forest; 11 - balka with dark gray podzolic soils under an alder; 12 - gentle (steepness 3° –5°) loess surfaces with podzolic chernozems under an alder; 13 - gentle (steepness 3° – 5°) loess surfaces with podzolic chernozems under plantation of *Picea abies*; 14 - gentle (steepness 3° –5°) loess surfaces with podzolic chernozems under an ash forest; 15 - gentle (steepness 3° – 5°) loess surfaces with dark gray podzolic soils under an alder; 16 - gentle (steepness 3° – 5°) loess surfaces with dark gray podzolic soils under ash forest; 17 - gentle (steepness 3° – 5°) loess surfaces with dark gray podzolic soils under plantation of *Picea abies*; 18 - gentle (steepness 3° – 5°) loess surfaces with dark gray podzolic soils under forest clearings with thickets of *Sambucus nigra***,** *Acer platanoides and Acer negundo*; 19 - gentle (steepness 3° – 5°) loess surfaces with dark gray podzolic soils under synanthropized meadows; 20 - slope (steepness 5° - 8°) loess surfaces with podzolic chernozems under alder; 21 - slope (steepness 5° - 8°) loess surfaces with podzolic chernozems under ash forest; 22 - slope (steepness 5° - 8°) loess surfaces with podzolic chernozems under plantation of *Picea abies*; 23 - slope (steepness 5° - 8°) loess surfaces with dark gray podzolic soils under ash forest; 24 - slope (steepness 5° - 8°) loess surfaces with dark gray podzolic soils under orchard; 25 - slope (steepness 5° - 8°) loess surfaces with dark gray podzolic soils under meadow vegetation; 26 - slope (steepness 5° - 8°) loess surfaces with dark gray podzolic soils under plantation with dominance of *Acer negundo*; 27 - steep (steepness over 8°) loess surfaces with podzolic chernozems under ash forest; 28 - steep (steepness over 8°) loess surfaces with dark gray podzolic soils under ash forest.

Flat interfluve type of terrain. Tracts: 29 - flat loess surfaces with podzolic chernozems under ash forest; 30 - slightly undulating loess surfaces with dark gray podzolic soils under ash forest ; 31 - low (up to 0.7 m), 3 m wide bulwark from a mixture of soils and loess loams under old-growth plantations of *Fraxinus excelsior*; 32 - shallow (up to 0.3 m), 1.1 m wide ditch from a mixture of soils and loess loams, without vegetation; 33 - slightly undulating loess surfaces with dark gray podzolic soils under plantation of *Picea abies*; 34 - slightly undulating loess surfaces with dark gray podzolic soils under forest clearings with thickets of *Sambucus nigra***,** *Acer platanoides and Acer negundo*; 35 -

slightly undulating loess surfaces with dark gray podzolic soils under an orchard; 36 - slightly undulating loess surfaces with dark gray podzolic soils under meadow vegetation; 37 - slightly undulating loess surfaces with dark gray podzolic soils under synanthropized meadows; 38 - slightly undulating loess surfaces with dark gray podzolic soils under thickets of shrubs and undergrowth of forest species; 39 - slightly undulating loess surfaces with dark gray podzolic soils under hay meadows, with a playground; 40 - a depression 2-3 m deep, 2-6 m wide with meadow vegetation; 41 - an embankment up to 1 m high, 1-2 m wide from a mixture of soil and loess loam under plantations of *Fraxinus excelsior*; 42 - a depression 2-3 m deep with the remains of the foundation of the palace of barons M.Y. and Y.M. Korf under plantations of *Fraxinus excelsior*.

Tracts: 43 - sand and gravel paths 2-3 m wide; 44 - dirt paths 0.5-2 m wide, overgrown with grassy vegetation.

Architectural monuments: 45 – "Park and park buildings. Entrance gates and fence"; 46 – "Park and park buildings. Bridge".

47 - numbers of the blocks.

Malus domestica, Robinia pseudoacacia grow here. Among the shrubs *Rosa canina, Prunus spinosa and Euonymus europaeus* are found.

The tracts of slightly undulating loess surfaces with dark gray podzolic soils under synanthropized meadows are represented by four plots with a total area of 0.56 ha. One of them is located in block No. 4, surrounded on all sides except the northern one by the previous type of tracts, has an area of 0.21 ha and is a steppe meadow. The other three plots are located on the border of blocks No. 6 and 7, on the central clearing. Their areas are 0.16, 0.10 and 0.09 ha, respectively. *Sambucus ebulus, Coronilla varia, Trifolium pratense, Taraxacum officinale, Campanula bononiensis, Saponaria officinalis and Chenopodium ucrainicum* grow here.

The tract of flat loess surfaces with podzolic chernozems under an ash forest has formed in the extreme southern and south-western parts of the Synytsky Park, on an area of 0.54 hectares. A significant number of centuries-old trees are concentrated here. *Fraxinus excelsior* predominates. In addition to it, *Quercus robur, Tilia cordata and Populus nigra 'Italica'* have been found.

The tracts of slightly undulating loess surfaces with dark gray podzolic soils under forest clearings with thickets of *Sambucus nigra*, *Acer platanoides and Acer negundo* together occupy an area of 0.28 hectares. 8 plots of these tracts have been identified in the park. Three of them with an area of 0.02 hectares each are located in the eastern part of block No. 2. Another 3 plots with an area of 0.04 hectares and one with an area of 0.05 hectares are located in block No. 7. The eighth plot with an area of 0.04 hectares was formed in the south-east of block No. 3.

The tract of slightly undulating loess surfaces with dark gray podzolic soils under plantations of *Picea abies* was formed on the basis of 150 specimens of this species of trees 50–55 years old. It is located in the eastern part of block No. 2 and in the western part of block No. 3 and occupies an area of 0.24 hectares.

The tract of slightly undulating loess surfaces with dark gray podzolic soils under hay meadows, with a playground, was formed in the north-eastern part of block No. 8 and occupies an area of 0,18 ha. The structure of this tract contains technical elements: benches, children's swings, slides, and a labyrinth.

The tract of slightly undulating loess surfaces with dark gray podzolic soils under an orchard was formed in block No. 9, along the sand-gravel path leading to the central entrance to the park (Fig. 4). It occupies an area of 0.12 hectares. The following trees grow here: *Juglans regia, Pyrus communis, Prunus cerasifera, Malus domestica*.

The tracts of slightly undulating loess surfaces with dark gray podzolic soils under meadow vegetation were formed in the same part of the park as the previous tract. They are represented by two plots with a total area of 0.02 hectares.

Depression 2-3 m deep with the remains of the foundation of the palace of barons M.Y. and Y.M. Korf under plantations of *Fraxinus excelsior* (area 0.07 ha) is occupied an important place in the modern landscape structure of the Synytsky Park. Here in the middle of the 18th century a house with columns of the Polish landowner Fedir Stefanovych Iielovitskyi was built. His father, Stefan Mykolayovych, founded and formed the Synytsky Park, and Fedir Stefanovych continued the formation of the valuable garden and park landscape [19]. In 1868, the Synytsky estate, together with the park, became the property of Baron Josyp Mykolaiovych Korf. A new two-story palace with 48 rooms was quickly built near the old house of Iielovitskyi. A fountain was arranged near the palace. A large role in the development of the Synytsky Park was played by the baron's son, Mykola Josypovych Korf. Unfortunately, the palace was destroyed. However, its remains are protected as a part of the architectural monument of national importance "Park and park buildings. Ensemble" (the last quarter of the 18th century - the 1870s).

In the modern landscape structure of the Synytsky Park, the second place (9.5 hectares or 20.65 % of the park's territory) is occupied by tracts of gentle (steepness 3°–5°) loess surfaces with dark gray podzolic soils under ash forest of slope type of terrain (Fig. 4). Two sections of these tracts are distinguished. A smaller area (4.58 ha) was formed around the

balka, in block No. 2; in a significant part of block No. 5; in the northern and western parts of block No. 11. In the western part of block No. 6, to the west of the dried-up brook, facies of the bottom of a drained pond under *Alnus glutinosa* were discovered.

The larger area (4.92 ha) was formed around the balka, in blocks No. 2 and 6, in the southern part of the latter; in the south-western part of block No. 7; in the southern part of block No. 8; in the southern and south-western parts of block No. 9. In block No. 6, facies of orchards remains (walnut, apple and plum) were discovered. Currently these gardens are densely overgrown with growth of local forest species and the introducer *Acer negundo*. In the southern part of block No. 8, two facies were formed: steep (over 8°), 2 m high slopes in loess loams with meadow vegetation; depression in loess loams 2-3 m deep, 2-6 m wide, 25 m long with meadow vegetation.

The tract of balka with dark gray podzolic soils under ash forest was formed on an area of 0.55 ha at the base of a drying up brook, in blocks No. 2 and 6. In block No. 2, facies of bottom of balka under age-old trees of *Populus alba* and of different ages trees of *Alnus glutinosa* were discovered. This tract turns into a tract of balka with dark gray podzolic soils under alder. It occupies an area of 0.28 ha and is located in the south-west of block No. 6. Within this tract, a facies of an earth mound 1–1.2 m high, 3 m wide with meadow vegetation is distinguished.

Around the balka, in blocks No. 2 and 6, two tracts of slope (steepness 5° - 8°) loess surfaces with dark gray podzolic soils under ash forest with a total area of 0.28 ha were formed. Another section of this type of tract with an area of 0.76 ha was formed in the southern part of block No. 8, in the south-western and central parts of block No. 9.

The tract of slope (steepness 5° - 8°) loess surfaces with dark gray podzolic soils under an orchard was formed in the extreme eastern part of the park, in block No. 9, on an area of 0.32 hectares. 20-45-year-old trees of *Juglans regia, Pyrus communis, Prunus cerasifera, Malus domestica* grow here.

In this same part of block No. 9, on areas free from trees and shrubs, the tracts of slope (steepness 5° - 8°) loess surfaces with dark gray podzolic soils under meadow vegetation have formed. There are 4 sections of these tracts with a total area of 0.44 ha distinguished. In the structure of these tracts, a facies of *Picea abies* from 25 to 60 years old is distinguished.

The total area of the tracts of gentle (steepness of 3° – 5°) loess surfaces with dark gray podzolic soils under synanthropized meadows in the Synytsky Park is 0.2 ha. Three plots of them have been formed. The largest (0.18 ha) plot is located in the south-eastern part of block No. 9. The following species of meadow grass grow here: *Hypericum perforatum, Poa angustifolia, Jacobaea vulgaris, Inula helenium, Trifolium pratense, Medicago falcata*. The other two plots were formed in the eastern part of block No. 6. *Sambucus ebulus, Securigera varia, Trifolium pratense, Taraxacum officinale, Campanula bononiensis, Chenopodium ucrainicum* grow here.

The tract of slope (steepness 5° - 8°) loess surfaces with dark gray podzolic soils under plantations with dominance of *Acer negundo* was formed in the extreme eastern part of block No. 9. It occupies an area of 0.61 hectares. *Acer negundo*, 20-35 years old, dominates here. In addition, there are single specimens of *Juglans regia, Quercus robur, Populus nigra 'Italica', Fraxinus excelsior, Populus tremula.*

In the southern part of block No. 8 and in the south-western part of block No. 9, the tract of steep (steepness over 8°) loess surfaces with dark gray podzolic soils under ash forest is distinguished (Fig. 4). It is located on the shore of the pond, extends for 340 meters, has an area of 0.26 hectares. Here grow old trees of *Fraxinus excelsior and Alnus glutinosa*, a facies with old specimens of *Pinus nigra* is distinguished.

The tracts of gentle (steepness 3°–5°) loess surfaces with dark gray podzolic soils under alder in Synytsky Park occupy an area of 0.56 ha. The largest of them (0.37 ha) was formed in the central and south-western parts of block No. 11. This is an alder of natural origin. The first tier here is formed by a *Alnus glutinosa* 70 years old and up to 23 m high. As admixtures, *Ulmus glabra, Acer platanoides, Tilia cordata, Fraxinus excelsior, Fraxinus excelsior* are found. The smallest in area (0.19 ha) is located in the south-western part of block No. 6 (Fig. 4). It is represented by a restored grove *of Alnus glutinosa*.

The tract of slope (steepness 5° - 8°) loess surfaces with podzolic chernozems under alder was formed in the south-western part of block No. 11. It is extends from north-west to south-east by 212 meters and has an area of 0.32 hectares.

The tracts of gentle (steepness 3° – 5°) loess surfaces with podzolic chernozems under alder occupy an area of 0.96 ha. The largest tract (0.87 ha) is located in block No. 11. Here grow 291 trees of *Picea abies*, approximately 55 years old and 20-25 m high. In the form of single admixtures, there are *Ulmus glabra, Aesculus hippocastanum, Carpinus betulus, Acer platanoides, Acer campestre, Prunus padus*. The second tract with an area of 0.09 ha is located in block No. 12. The age of the spruces is 50 years, height – 20-22 m.

The tracts of slope (steepness 5° - 8°) loess surfaces with podzolic chernozems under plantation of *Picea abies* occupy a total area of 0.93 ha. The largest area (0.79 ha) is occupied by the tract in the cen-

tral part of block No. 12. Here grow 310 trees of spruce about 50 years old and 20-22 m high. The plantation was created as a monodominant, but now an undergrowth of deciduous species, primarily *Acer platanoides*, has formed. There is a lot of *Sambucus nigra* here, and *Ulmus glabra, Acer pseudoplatanus, Fraxinus excelsior, Morus alba* grow. The second tract of this type was formed in the south-western part of block No. 11 and has an area of 0.14 ha.

There are two tracts of gentle (steepness 3° – 5°) loess surfaces with podzolic chernozems under ash forest with a total area of 1.42 hectares. The larger tract (0.8 hectares) was formed in the south-eastern part of block No. 11. The second tract occupies the southern part of block No. 12. In addition to the *Fraxinus excelsior*, *Ulmus glabra, Ulmus laevis, Acer platanoides, A. pseudoplatanus, A. campestre, A. negundo*, *Tilia cordata* grow here.

There are 4 tracts of slope (steepness 5° - 8°) loess surfaces with podzolic chernozems under ash forest in the Synytsky Park. Together, they occupy an area of 1.11 hectares. Two of them are located in block No. 11, and two more in block No. 12. The largest tracts (0.56 and 0.44 hectares) have been formed in the latter block. The tracts of block No. 11 occupy insignificant areas (0.11 and 0.01 hectares). In addition to the *Fraxinus excelsior*, *Quercus robur, Ulmus glabra, Acer platanoides, A. pseudoplatanus, A. campestre, Carpinus betulus Tilia cordata* grow here. The two-tiered forest stand reaches a height of 30 meters. There are age-old specimens of *Fraxinus excelsior, Carpinus betulus and Acer platanoides*.

The tracts of steep (steepness over 8°) loess surfaces with podzolic chernozems under ash forest occupy an area of 0.97 ha. The largest tract (0.77 ha) is located in block No. 12, on the right bank of the pond. Two more tracts were formed in block No. 11, one of them with an area of 0.13 ha - on the bank of the pond, the other with an area of 0.07 ha - in the south-west. The species composition of these tracts is the same as the previous ones. In addition to them, there are age-old specimens of *Alnus glutinosa, Larix sibirica, Picea obovata, Pinus sylvestris, Populus alba*.

The channel type of terrain of the Synytsky Park has undergone significant changes in the process of anthropogenic transformation. A significant part of the river beds is flooded with pond waters, the rest has turned into tracts of drying river beds with a muddy bottom, littered with branches and remnants of tree trunks, which is overgrown with grassy vegetation. The drying river bed of the Synytsia River today has a length of only 309 m, and its left tributary, located in the north-east of the park, is 312 m. Both the river and its tributary appear only at the end of winter and in spring, during the melting of snow. Another tributary of the Synytsia River, which flows in the balka, has not appeared for the last five years. The length of its dried river bed is 393 m. Thus, the total length of this type of tract within the park is 1014 m, and the area is 0.16 ha (0.35 % of the park area). This is half the number compared to the middle of the 18th century [17].

Due to the flooding of the dominant part of the river flood-plains by pond waters, the flood-plain type of the terrain was transformed into a pond-flood-plain type. Its modern landscape structure is dominated by pond tracts with an average depth of 0.9 - 1.1 meters with a muddy bottom (7.16 hectares or 15.57 % of the park area).

Three islands were created within the pond, on the basis of which three types of tracts were formed. The tract of island 51 m long, 17–41 m wide, 1–1.1 m high, composed of loess loams, with sparse park trees, young plantings of ornamental shrubs and perennial grasses is located in the central part of the pond and occupies an area of 0.21 ha. *Populus alba, Pinus nigra, Fraxinus excelsior and Tilia cordata* grow here. The decorative compositions include *Berberis thunbergii, Syringa vulgaris, Corylus colurna, Salix matsudana, Lonicera caprifolium, Catalpa ovata, Pyracantha coccinea.*

In the western part of the pond, on an area of 0.16 ha, a tract of a swampy island 71 m long, 6 - 17 m wide, 1 - 1.3 m high, composed of loess loams, under alder has formed. The age of the alder is about 35 years, height is 14-17 m, some trees are dry. In addition to the *Alnus glutinosa*, there are several specimens of *Quercus robur*. In the eastern part of the pond, on an area of 0.1 ha, the tract of a swampy island 54 m long, 12 - 28 m wide, 0.8 - 1.1 m high, composed of loess loams, under willow was formed. *Salix alba and Salix purpurea* about 30 years old grow here.

Within the boundaries of the Synytsky Park, 2 tracts of leveled, over moistened alluvial surfaces with meadow soils under alder with a total area of 1.19 hectares have formed. The largest of them (0.66 hectares) is dense coastal thickets in the eastern upper reaches of the pond and around the drying brook. This is mainly a spontaneous forest. In addition to *Alnus glutinosa*, in it *Salix alba* and *S. purpurea* 20-35 years old grow. A somewhat smaller area (0.53 ha) is occupied by a tract in the valley of the Synytsia River. This is an alder forest of natural origin, the basis of which is formed by *Alnus glutinosa*, approximately 70 years old and up to 23 m high. It is mixed with *Ulmus glabra, Aesculus hippocastanum, Acer platanoides, Tilia cordata*.

Within the park, there are 2 tracts of leveled, swampy alluvial surfaces with bog soils under alder with a total area of 0.15 ha (Fig. 4). The largest of them (0.11 ha) was formed in the western upper

reaches of the pond and in the mouth of the Synytsia River, the smallest (0.04 ha) - in the eastern upper reaches of the pond and in the mouth of the left tributary of the Synytsia River.

There are 2 tracts of leveled, over moistened alluvial surfaces with meadow soils under flood-plain meadows with a total area of 0.23 ha in block No. 9. The smallest of them (0.08 ha) was formed on the shore of the pond, the largest (0.15 ha) was formed on the left bank of the tributary of the Synytsia River. *Carex hirta*, *Trifolium pratense* and *Mentha longifolia* grow here.

Small plots (0.02 ha) are occupied by two tracts of leveled alluvial surfaces with meadow soils under willows. They are located on the left bank of the pond, in the south of blocks No. 6 and 8. Here grow planted specimens of *Salix alba, S. purpurea, S. babylonica, Populus nigra 'Italica'*. In addition to them, there are *Alnus glutinosa, Acer campestre, A. platanoides, Ulmus glabra*.

The important infrastructural components of the modern landscapes of the Synytsky Park are tracts of sand and gravel paths 2-3 m wide. Their total length is 3242 meters, and their area is 0.81 hectares (1.76 % of the park area).

In addition to the decorated paths, tracts of dirt paths 0.5-2 m wide, overgrown with grassy vegetation have been formed in Synytsky Park. Their total length is 3288 meters, and the area is 0.41 hectares (0.89 % of the park area).

There are architectural monuments of national significance "Park and park buildings. Ensemble", "Park and park buildings. Entrance gate and fence", "Park and park buildings. Bridge" in the Synytsky Park. The first of them covers the entire park. The second monument covers the remains of the entrance gate with a red brick fence, which was used to enclose the estate. The third monument is an arched nine-span bridge, which was made at the beginning of the 19th century from red brick in the classicist style. The bridge served as the entrance to the estate and connected the main avenue of the park with the palace, which has not survived.

Thus, the Synytsky Park protects the valuable natural and cultural heritage of Ukraine. Therefore, it is a biocenter of the local ecological network of the Uman district of the Cherkasy region, which performs an important function of preserving biotic and landscape diversity [18].

Conclusion. It was found that both in the restored (middle of the 18th century) and in the modern landscape structures of the Synytsky Park, slope terrains prevailed and still prevail (44.17 % of the park area). Slightly smaller areas (40.40 % of the park area) are occupied by flat interfluve terrains. 14.71 % of the modern territory of the park was occupied by flood-plain terrains in the past. The smallest areas (0.72 % of the park's territory) in the restored landscape structure were occupied by channel terrains.

The tracts of gentle (with a steepness of 3° – 5°) loess surfaces with dark gray podzolic soils under hornbeam oak forests dominated (50.74 % of slopes and 22.4 % of the current park area) in the landscape structure of the slope terrains in the middle of the 18th century. The tracts of slightly undulating loess surfaces with dark gray podzolic soils under hornbeam oak forests dominated in the structure of the flat interfluve terrains (96.82 % of the flat interfluve terrains and 39.11 % of the park area).

The largest areas in the structure of flood-plain terrains (40.32 % flood-plain and 5.93 % of the park territory) were previously occupied by alder tracts. The aquatic tracts of the central deep water and coastal shallows of the pools areas dominated (93.9 % of the riverbeds) in the structure of the channel terrains of the Synytsky Park.

The landscape structure of the modern territory of the Synytsky Park has become significantly diversified and complicated in the process of economic development. Based on 14 types of tracts that existed here in the middle of the 18th century, 44 types of anthropogenic tracts have been formed and are currently distinguished. The most common (34.46 % of the park area) tracts in the modern landscape structure of the park are slightly undulating loess surfaces with dark gray podzolic soils under ash forest of the flat interfluve terrains. The second place (20.65 % of the park area) is occupied by tracts of gentle (steepness 3° –5°) loess surfaces with dark gray podzolic soils under ash forest of the slope terrains. Thus, hornbeam forests have been replaced by plantations with a predominance of *Fraxinus excelsior* in most of the park. The area of the channel terrains in the Synytsky Park has decreased by half compared to the middle of the 18th century. A significant part of the rivers is flooded with pond waters, the rest has turned into drying channels. Due to the flooding of the dominant part of the river flood-plains by pond waters, the flood-plain type of terrains has transformed into a pond-flood-plain type. The pond tracts with an average depth of 0.9 - 1.1 meters with a muddy bottom dominate (15.57 % of the park area) here.

Promising are the forecasting of the further development of landscape complexes, the development of measures to optimize the modern landscape structure of the Synytsky Park.

Bibliography

1. Барановський, В.А., Шищенко, П.Г., Дмитрук, О.Ю. (2004). Україна. Техногенна небезпека. Масштаб 1:3 000 000. Київ.

2. Денисик, Г. І. (1998). Природнича географія Поділля. Вінниця: ЕкоБізнесЦентр.
3. Денисик, Г., Яцентюк, Ю., Воровка, В., Воловик, В. (2021). Біоцентри екологічної мережі міста Вінниці. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія». (54), 267-277. DOI: https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-54-20.
4. Екологічний атлас України. (2009). Гол. ред. Л.Г. Руденко. Київ: «Центр екологічної освіти та інформації».
5. Ковтонюк, А.І., Діденко, І.П., Куземко, А.А. (2021). Раритетна фракція спонтанної флори садово-паркових ландшафтів Середнього Побужжя. Journal of Native and Alien Plant Studies. 1. 136-144. DOI: http://doi.org/10.37555/2707-3114.1.2021.247565.
6. Кравцова, І.В., Лаврик, О.Д. **(**2018**).** Просторово-часовий аналіз формування структури сучасних садово-паркових ландшафтів Правобережної України. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Географія. 4(73). 39-44. DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2721.2019.73.8.
7. Кравцова, І. (2024). Садово-паркові ландшафти Центральної Європи як ландшафтно-технічні системи. Журнал «Ландшафтознавство». 6(2). 41-53. DOI: http://doi.org/10.31652/2786-5665-2024-6-41-53
8. Кравцова, І. В. (2023). Структура садово-паркових ландшафтів Центральної Європи. Український журнал природничих наук. 1. 89-108. DOI: http://doi.org/10.35433/naturaljournal.1.2023.89-108
9. Лаврик, О. **(**2015**).** Річкові ландшафтно-технічні системи. Умань: ВПЦ «Візаві».
10. Національний атлас України (2007). Гол. ред. Л. Г. Руденко. Київ: ДНВП «Картографія».
11. Куземко, А.А., Дідух,,Я.П., Онищенко, В.А, Шеффер. Я. (2018). Національний каталог біотопів України. Київ: ФОП Клименко Ю.Я.
12. Природно-заповідний фонд Черкаської області. (2006). Черкаси: Вертикаль.
13. Совгіра, С.В., Гончаренко, Г.Є., Грабовська, С.Л., Подзерей, Р.В. (2011). Квазіприродні ландшафти Центрального Побужжя. Київ: Науковий світ.
14. Ткачук, І.В. (1965). Про маловідомий парк у селі Синиця на Черкащині. Матеріали III з'їзду Українського ботанічного товариства. Київ, 288.
15. Шиндер, О.І., Яцентюк, Ю.В., Чорна, Г.А., Коструба, Т.М. (2024). Флора парку-пам'ятки садового паркового мистецтва «Синицький парк» (Черкаська область). Чорноморський ботанічний журнал. 20 (4). 410–438. DOI: http://doi.org/10.32999/ksu1990-553X/2024-20-4-4.
16. Яцентюк, Ю.В., Воровка, В.П., Гришко, С.В. (2021). Ландшафтні комплекси регіонального ландшафтного парку „Мурафа". Людина та довкілля. Проблеми неоекології. (35): 93-104. DOI: https://doi.org/10.26565/1992-4224-2021-35-09.
17. Denysyk, Hr. I., Yatsentiuk,Yu.V., Denysyk, B. Hr., Chyzh, O. P., & Voina, I. M. (2024). Modern Anthropogenic Hydrosphere of Ukraine. Ukrainian Geographical Journal. 4: 12–21. DOI: https://doi.org/10.15407/ugz2024.04.012.
18. Sinica. Słownik geograficzny Królestwa Polskiego. (1889). Warszawa: Wieku. 10. 618
19. Volovyk Volodymyr, Lavryk Oleksandr, Yatsentyuk Yuriy, Maksiytov Andrii. (2022). Polish ethnocultural landscape of Podillya: structure, use, protection of cultural heritage. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology". (57), 68-80. DOI: https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-06.
20. Яцентюк, Ю. В. Проект утримання та реконструкції території парку-пам'ятки садово-паркового мистецтва місцевого значення "Синицький парк". Вінниця.

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

References

1. Baranovskyi, V.A., Shyshchenko, P.Hr., & Dmytruk, O.Yu. (2004). Ukraine. Man-made danger. Scale 1:3 000 000. Kyiv [in Ukrainian].
2. Denysyk, Hr. I. (1998). Natural geography of Podillia. Vinnytsia: EcoBusiness Center, [in Ukrainian].
3. Denysyk, Hr., Yatsentyuk, Yu., Vorovka, V., & Volovyk, V. (2021). The biocentres of the ecological network of Vinnytsia city. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology". 54. 267-277. [in Ukrainian]. DOI: https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-54-20.
4. Ecological atlas of Ukraine (2009). Chief editor L. Hr. Rudenko. Kyiv: Center for Environmental Education and Information, [in Ukrainian].
5. Kovtonyuk, A. I., Didenko, I. P., Kuzemko, A. A. (2021). Rare fraction of spontaneous flora of the garden and park landscapes of the Middle Pobuzhzhia. Journal of Native and Alien Plant Studies. 1. 136-144. [in Ukrainian]. DOI: http://doi.org/10.37555/2707-3114.1.2021.247565.
6. Kravtsova, I., Lavryk, O., (2018) Spatial-temporal analysis formation of the structure of modern garden-park landscapes of Right-bank Ukraine. Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geography. 4(73). 39-44. [in Ukrainian]. DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2721.2019.73.8.

7. *Kravtsova, I., (2024). Garden and park landscapes of Central Europe as landscape and technical systems. Journal «Landscape Science», 6(2). 41-53. [in Ukrainian]. DOI: http://doi.org/10.31652/2786-5665-2024-6-41-53.*
8. *Kravtsova, I. V., (2023). The structure of landscape gardening landscapes in Central Europe. Ukrainian Journal of Natural Sciences. 1. 89-108. [in Ukrainian]. DOI: http://doi.org/10.35433/naturaljournal.1.2023.89-108*
9. *Lavryk, O., (2015). River landscape and technical systems. Uman: Publishing and printing center "Vizavy", [in Ukrainian].*
10. *National atlas of Ukraine. (2007). Chief editor L. Hr. Rudenko. Kyiv: State Scientific and Production Enterprise "Cartography", [in Ukrainian].*
11. *Kuzemko, A.A., Didukh, Ya.P., Onyshchenko, V.A., & Sheffer, Ya., (2018). National habitat catalogue of Ukraine. Kyiv: An individual entrepreneur Klymenko Yu.Ya., [in Ukrainian].*
12. *Nature reserve fund of Cherkasy region. (2006). Cherkasy: Vertical, [in Ukrainian].*
13. *Sovhira, S.V., Honcharenko, H.Ye., Hrabovska, S.L., & Podzerei, R.V. (2011). Quasi-natural landscapes of Central Pobuzhzhia. Kyiv: Scientific world, [in Ukrainian].*
14. *Tkachuk, I.V., (1965). About a little-known park in the village of Sinytsia in Cherkasy region. Materials of the III Congress of the Ukrainian Botanical Society. Kyiv, p.288. [in Ukrainian].*
15. *Shynder, O.I., Yatsentyuk, Y.V., Chorna, H.A., Kostruba, T.M. (2024). Flora of the "Synytsky Park" landscape gardening monument (Cherkasy Region). Chornomorski Botanical Journal. 20(4): 410–438. [in Ukrainian]. DOI: http://doi:10.32999/ksu1990-553X/2024-20-4-4.*
16. *Yatsentyuk, Yu. V., Vorovka, V.P., & Hryshko, S.V. (2021). The Landscape Complexes of the Regional Landscape Park «Murafa». Man and Environment. Issues of Neoecology. Vol. 35. P. 93-104. [in Ukrainian]. DOI: https://doi.org/10.26565/1992-4224-2021-35-09.*
17. *Denysyk, Hr. I., Yatsentiuk,Yu.V., Denysyk, B. Hr., Chyzh, O. P., & Voina, I. M. (2024). Modern Anthropogenic Hydrosphere of Ukraine. Ukrainian Geographical Journal. 4: 12–21. DOI: https://doi.org/10.15407/ugz2024.04.012.*
18. *Sinytsia. Geographical dictionary of the Kingdom of Poland. (1889). Warsaw: Wieku, 10. p. 618 [in Polish].*
19. *Volovyk Volodymyr, Lavryk Oleksandr, Yatsentyuk Yuriy, Maksiytov Andrii. (2022). Polish ethnocultural landscape of Podillya: structure, use, protection of cultural heritage. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology". 57. 68-80. DOI: https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-06.*
20. *Yatsentiuk,Yu.V. (2024). Project of the maintenance and reconstruction of the territory of the park-monument of garden and park art of local importance "Synytsky Park". Vinnytsia. [in Ukrainian].*

Відновлена та сучасна ландшафтні структури Синицького парку у Черкаській області

Юрій Яцентюк [1]
д. геогр. н., професор, кафедра географії,
[1]Вінницький державний педагогічний університет
імені Михайла Коцюбинського, Вінниця, Україна;
Володимир Воловик [1]
д. геогр. н., професор, кафедра географії;
Олена Міщенко [2]
д. геогр. н., доцент, кафедра фізичної географії,
[2] Волинський національний університет імені Лесі Українки,
Луцьк, Україна;
Світлана Гришко [3]
к. геогр. н., доцент, кафедра географії та туризму,
[3] Мелітопольський державний педагогічний університет
імені Богдана Хмельницького, Запоріжжя, Україна;
Ірина Кравцова [4]
д. геогр. н., доцент, кафедра екології та безпеки життєдіяльності,
[4] Уманський національний університет садівництва, Умань, Україна

Метою статті є виявлення особливостей ландшафтних комплексів парку-пам'ятки садово-паркового мистецтва місцевого значення «Синицький парк» (далі – Синицький парк). Для досягнення мети впродовж 2023-2024 років було проведено ландшафтознавчі дослідження території. Вперше виявлено особливості відновленої (на середину XVIII ст.) ландшафтної структури парку. Більш детально проаналізовано і уточнено інформацію про особливості сучасної ландшафтної структури Синицького парку. Виявлено особливості антропогенної трансформації типів місцевостей та урочищ парку з середині XVIII ст. до наших днів. Вперше розроблено карти реконс-

трукції (середина XVIII ст.) ландшафтів та сучасних ландшафтів Синицького парку. Виявлено, що як у відновленій, так і в сучасній ландшафтних структурах Синицького парку переважали і переважають (44,17 %) схилові місцевості, 40,4 % території займають плакорні місцевості. 14,71 % від сучасної території парку у минулому займали заплавні місцевості, 0,72 % - руслові місцевості. Найбільші площі в середині XVIII ст. займали урочища слабо хвилястих лесових поверхонь з темно-сірими опідзоленими ґрунтами під грабовими дібровами плакорних місцевостей (39,11 %) та пологих (крутизною 3^0–5^0) лесових поверхонь з темно-сірими опідзоленими ґрунтами під грабовими дібровами (22,4 %). Виявлено, що у процесі господарського освоєння значно урізноманітнилась та ускладнилась ландшафтна структура сучасної території Синицького парку. На основі 14-ти типів урочищ, що існували тут в середині XVIII ст., сформувалось і виділяється наразі 44 типи антропогенних урочищ. Найбільш поширеними (34,46 %) урочищами парку є слабо хвилясті лесові поверхні з темно-сірими опідзоленими ґрунтами під ясеневим лісом плакорного типу місцевостей. Виявлено, що, у порівнянні з серединою XVIII ст., площі руслового типу місцевостей Синицького парку зменшились вдвічі. Значна частина річищ затоплена водами ставка, решта перетворилась на пересихаючі русла. У зв'язку із затопленням домінуючої частини річкових заплав водами ставка, заплавний тип місцевостей трансформувався на ставково-заплавний. На більшій частині парку грабові діброви замінені насадженнями із переважанням ясену звичайного.

***Ключові слова**: Синицький парк, ландшафтна структура, місцевість, урочище, сталий розвиток громади, збереження екосистем, раціональне використання природних ресурсів, грабова діброва, природна спадщина, культурна спадщина.*

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 15 квітня 2025 р.

Прийнята 2 червня 2025 р.

ЕКОЛОГІЯ

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-36
UDC 551.46:502.131

Received 1 May 2025
Accepted 10 September 2025

The role of morphometric indicators of relief in the assessment of ecogeomorphological conditions in the Fuzuli administrative region

Samira Abushova
PhD (Geomorphology), Senior Researcher at Department of Geomorphology and Paleogeography,
Ministry of Science and Education RA, Institute of Geography
named after Academician Hasan Aliyev, Baku, Azerbaijan,
e-mail: abushova.samira88@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-2567-8876

ABSTRACT

In the assessment of ecogeomorphological conditions, morphometric indicators of relief (such as slope, elevation differences, horizontal and vertical fragmentation, exposure etc.) make it possible to determine the intensity of natural processes and the characteristics of ecological risk formation within the area. The article analyzes the morphometric indicators and ecogeomorphological assessment of the relief of the Fuzuli administrative region. The characteristics of the morphometric parameters of the relief include quantitative indicators of the degree of complexity of the formation of the relief of the earth's surface. Morphometric indicators wich determine the complexity coefficient of the earth's surface relief play an important role in the implementation of engineering works, as well as territorial planning. Quantities of morphometric indicators were calculated based on the digital elevation model of the relief (Aster DEM) of Azerbaijan and interpolated in the Arcmap 10.8 software to determine the degree of tension of the territory. According to the ecogeomorphological tension, the study area was divided into 3 zones and the morphometric values of each zone were given. It was determined that 36.98% of the Fuzuli administrative region has favorable conditions for the construction of infrastructure.

The aim of this study. To determine the degree of ecogeomorphological tension of the area based on the morphometric indicators of the relief. This allows for identifying areas with high susceptibility to natural processes and assessing potential ecological risks.

Research Methodology. The research maps, created using the Mercator projection system, have been georeferenced and aligned with the WGS 1984 UTM Zone 38N coordinate system. Based on the digital model of the relief, the morphometric indicators of the relief (horizontal and vertical fragmentation, slope, exposure) were analyzed, quantified, and the degree of ecogeomorphological tension was determined using the interpolation method in the ArcMap program.

Results. The study area consists of 501.13 km² of low-voltage, 696.66 km² of medium-voltage, and 157.36 km² of high-voltage areas, which are mainly suitable for land use. Only 11.61 percent of the area has high voltage, which allows these areas to be used as pastures, as well as for tourism purposes. It is possible to carry out various tourism and recreational activities in these areas, including hiking, mountaineering, and other outdoor pursuits, taking advantage of the natural landscape and scenic relief features.

Keywords*: horizontal fragmentation, vertical fragmentation, slope, exposition, ecogeomorphological tension, territorial planning, exodynamic and endodynamic processes, morphometric indicators.*

In cites: Abushova Samira (2025). The role of morphometric indicators of relief in the assessment of ecogeomorphological conditions in the Fuzuli administrative region. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 494-506. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-36

Introduction. Global changes on Earth, as well as processes occurring in the climate, and further increase in the impact of anthropogenic factors on the environment increase the disruption of ecological balance. These changes lead to the intensification of exodynamic processes (erosion, gravity, karst, etc.) and, as a consequence, to the growth of ecogeomorphological tension. Since the end of the 20th century, the widespread development of ecological thinking in the world, the rapid "greening" of sciences, the transformation of environmental problems raised by the scientific community into the most important problems of humanity have created a great need for the development of a new scientific direction in the system of Earth sciences - geomorphology, as well as in other areas of science - ecological geomorphology [10, 11, 12, 13].

Recently, in Azerbaijan and its individual regions, certain research work has been carried out in the field of ecological geomorphology, which has developed as the most modern and promising direction of general geomorphology, and the corresponding results have been obtained [2].

As we know, the main natural factors determining the degree of territorial tension include endodynamic and exodynamic processes. The intensity of exodynamic and endodynamic processes, tectonic activity, in addition to affecting ecogeomorphological conditions, have a significant impact on population distribution and economic activity [21]. In addi-

© *Abushova Samira, 2025*

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

tion, the morphometric quantities of the relief formed under the influence of endodynamic and exodynamic processes are also among the main factors determining the ecogeomorphological tension of the territory [6].

Relief elements and morphometric parameters affect soil fertility, uneven distribution of precipitation, redistribution of moisture in the soil after precipitation, intensity of surface runoff, susceptibility to water erosion, as well as solar insolation. Morphometry is currently one of the main methods of geomorphology, as a mathematical analysis of the configuration of the earth's surface and the shapes and sizes of its relief forms. We can sometimes evaluate morphometric indicators as a result or a primary indicator of relative tectonic activity [18, 19]. Exogenous processes, in turn, change the relief over time, thus playing an important role in changing the quantitative indicators of the morphometric parameters of the relief. The study of quantitative indicators of the relief (the intensity of vertical and horizontal fragmentation, the inclination of the surface, the orientation of the slopes, the geometric dimensions of the relief forms, etc.) plays an important role in assessing the ecogeomorphological environment of the territory, and therefore in the territorial organization of the economy [9].

Morphometric indicators are mainly obtained on the basis of topographic maps and aerospace materials, as well as modern GIS technologies, and appropriate maps are compiled. Morphometric data is of great importance in the correct orientation of human settlement, construction of communication systems, production facilities, placement of agricultural areas, efficient use of natural resources, etc., as well as in the study of geomorphological regularities. The quantities of morphometric indicators depend on the processes that form the relief, the dynamics of relief forms, the lithological composition of rocks, tectonic conditions, etc. Analysis of morphometric indicators of the relief determines a number of its important characteristics and plays an important role in solving various practical problems, as well as in assessing environmental stress [1]. This, in turn, is of great importance in the construction of economic facilities, laying canals, laying roads, in short, in terms of land use.

Materials and methods. Today, science is faced with the task of creating technologies aimed at modern land use, infrastructure construction, and the formation of agricultural systems. In our modern era, obtaining scientifically-intensive, high-intensity data based on Geographic Information Systems (GIS) and precise technical means greatly facilitates both research work in various fields and our daily lives. In the stage before the emergence of GIS technology, people performed morphometric indicators of relief and cartometric work in general manually with certain auxiliary tools. Naturally, these studies required a lot of time and effort and, in some cases, were characterized by low quality when the area was large. In the stage after the emergence of Geographic Information Systems technology, cartometric and morphometric work began to be performed with the help of computer programs. Maps drawn up with computers, especially those prepared with ArcMap software, are distinguished by their accuracy, attractiveness, quick preparation, the ability to display individual content elements in the form of layers, and help researchers in conducting more accurate analyses [6].

Morphometry is currently one of the main methods of geomorphology, as the mathematical analysis of the configuration of the earth's surface and the shapes and dimensions of its landforms [4]. The increasing development of Geographic Information Systems, with the significant application of mapping software tools, allows for various spatial and topographic analyses based on digital elevation models of the terrain, as well as the analysis of hazardous exodynamic processes [16]. The main sources of information for morphometric analysis are largescale topographic maps, materials of field surveys, as well as data obtained from remote sensing of the earth. The use of GIS technologies and digital relief models allows creating thematic maps of the most important morphometric relief indicators. The preparation and analysis of maps were carried out on the basis of base maps of the Arcmap 10.8 software and the digital elevation model (Aster DEM) of Fuzuli.

During the preparation of ecogeomorphological tension map, horizontal fragmentation, vertical fragmentation, slope inclination and exposure maps are superimposed in layers. The quantitative degree of each morphometric indicator is appropriately matched with each other and the corresponding stress zones are created.

The research maps developed in the Mercator projection system are coordinated with WGS_1984_UTM_Zone_38N.

The preparation of the maps was carried out in the following sequence (Figure 1).

Discussion and conclusions.

The area of the Fuzuli region, which is the study area, is 1386 km², and the population is approximately 144 thousand people. There are 2 cities (Horadiz and Fuzuli), 16 settlements, 82 villages and other settlements. Fuzuli region borders Jabrayil, Khojavand, Agjabadi, Beylagan regions and Iran along the Araz River (Figure 2).

Agriculture, which has been the basis of the region's economy throughout history, is characterized by its high development here. This is explained by

the presence of gray, chestnut, gray-brown soils suitable for agriculture in terms of productivity. The geomorphological structure, physical-geographical conditions of the research area have been extensively studied in their research works by A.A. Mikayilov (1969), M. Suleymanov, B.A. Budagov (1981), E.K. Mikayilov (1969), M. Suleymanov, B.A. Budagov (1981), E.K. Alizadeh (1988), A.T. Hagverdiyev (1975), M.A. Museyibov (1981) and other Azerbaijani scientists. The Fuzuli administrative region is located in the southwest of the Lesser Caucasus fold-orogenic zone, on the Araz-bearing plains. According to the orohypsometric map of Karabakh, the main part of the Fuzuli administra-tive region consists of low mountainous and foothill parts. For this reason, the morphometric indicators of the terrain are mainly characterized by low values. According to the ecogeomorphological tension zoning of Karabakh, Fuzuli region covers part of the low-grade Front Caucasus sloping plains and the southwestern slope of the medium-grade Lesser Caucasus [5, 7].

Gravity relief forms are relatively poorly deve-

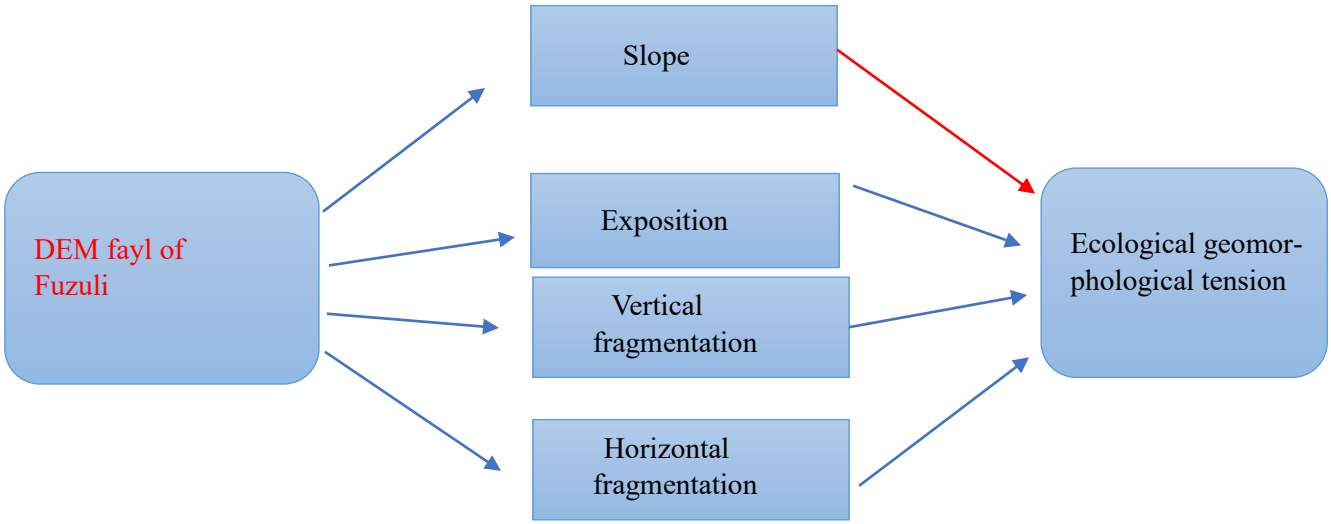


Fig. 1. Model used in the preparation of ecogeomorphological tension map

loped here. In its orographic structure, the Arazyan plains predominate, and the Ayidag, Khazar, Mangalenata, Agdash, and Jangulu mountains are located. These plains are mainly of denudation-accumulative origin, consisting mainly of proluvial and deluvial sediments. The Karabakh plain, one of the main orographic units, is covered with alluvial-proluvial sediments of rivers flowing from the eastern and northeastern slopes of the Small Gagaz. The plain, which has an undulating surface, is divided by a network of valleys and gorges, has an even more complex relief with numerous buried uplifts, and the conic formations of rivers flowing through the area. According to V.R. Volobuyev, the Karabakh plain was formed as a result of the transgression of the Caspian Sea in the IV period [15].

During the displacement of the river network, morphosculptures were formed on morphostructures formed as a result of endodynamic processes, further complicating the relief.

The rivers flowing through the Fuzuli region (Guruchay, Kondalanchay, Gozluchay, Charaken) are rivers of the Araz basin. Here, the Ashaghi Kondalanchay reservoir was built on the Kondalanchay and canals were laid, which is used to irrigate 24 thousand hectares of agricultural land.

As we know, the analysis of relief forms and geomorphological processes is of great importance for the development of exodynamic processes such as landslides and avalanches, for territorial planning or human activity.

During the ecogeomorphological assessment of the study area, four main morphometric indicators - horizontal and vertical fragmentation, slope inclination and exposure – were analyzed (Figure 3). These morphometric parameters of the relief, in addition to determining the level of ecogeomorphological tension of the relief, have a fundamental impact on territorial planning, the organization of the tourism industry, the placement of infrastructure, settlement, etc. For example, when carrying out excavation work on a construction site, irrigating agricultural fields, and selecting the shortest trajectory with the least excavation costs, the inclination of the relief must be taken into account.

The main sources of information for morphometric analysis are large-scale topographic maps, materials from field surveys, as well as data obtained from remote sensing of the earth. In the article, the Digital Relief Model was taken as the main source of information during morphometric analysis.

Horizontal fragmentation. As is known, the horizontal fragmentation of the relief is determined by the length of the erosion-ravine, ravine and ravine network [3]. In most cases, an increase in the amount of horizontal fragmentation indicators is ob-

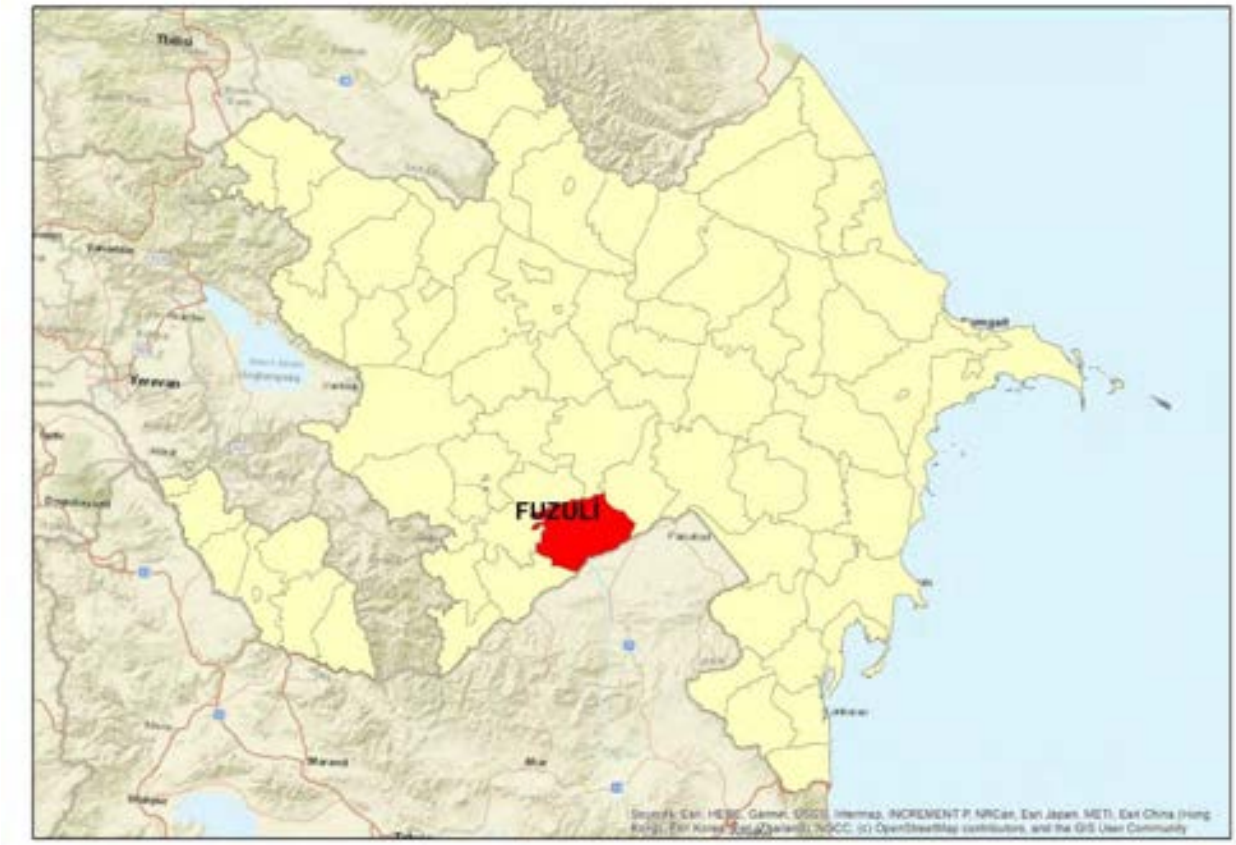


Fig. 2. Geographical location of Fuzuli district

served from the plain to the center of the mountainous area. For a long time, many scientists have resorted to traditional methods when analyzing the characteristics of watersheds, which can include measurements made on topographic maps with some tools (for example, curvimeters).

Thus, the horizontal fragmentation map was mainly compiled on the basis of a topographic map at a scale of 1:100,000. For this, the lengths of the valley network falling on a single area were measured on the map and divided by the area of that area [17]:

$$K = \frac{\text{L (km)}}{\text{S (km}^2\text{)}}$$

Here L is the length of the river-valley-ravine-gobu complex, S is the area of the square, K is the amount of fragmentation.

After determining the value of fragmentation, isolines were drawn at a certain interval covering the same quantitative indicators and maps were compiled. However, nowadays, remote sensing and GIS tools are widely used for watershed analysis The horizontal fragmentation of the area was prepared based on Aster DEM in the Arcgis 10.8 program. First, the river and ravine-ravine network of the area, as well as irrigation canals, was extracted, then a 1 km² grid of the area was created and the hydrographic network per square was calculated (Figure 3):

SRTM DEM → Processing over DEM → Fill → Flow direction → Flow accumulation → Stream definition → Stream to features → Defining sub-watershed → Stream order → Stream number → Stream length → ……→ Drainage density

Analysis of the compiled map shows that the high value of fragmentation coincides with the areas of the positive morphostructures of the territory corresponding to the mid-mountain belt. Here, the density of the valley-ravine network increases, and the energy of erosion processes reaches a high level.

The values of horizontal fragmentation mainly vary between 0.1 and 2.05 km/km^2. In general, the horizontal fragmentation indicator in the territory is observed in high values due to the density of the river network and the canals built for irrigation of agricultural lands. Thus, approximately 46% of the territory has a fragmentation value of 0.8-1.2 km/km^2 (Table 1). The highest indicator is 1.6-2.05 km/km^2, which covers 2.12% of the territory and is observed in the basins of the Kondalanchay, Guruchay and Araz rivers, as well as in areas where irrigation canals spread in agricultural lands (Graphic 1).

The main rivers affecting the quantitative indicators of horizontal fragmentation in the study area:

Araz – The rivers of the study area mainly flow into the Araz River. The Araz River, one of the main transit rivers of Azerbaijan and originating at an

altitude of 2,900 m from the Bingol peak in the Republic of Turkey is one of the basic river wich affecting the quantitative horizontal fragmentation of the surrounding areas. It plays an important role in irrigation of agricultural fields and household use.

Kondalanchay – The main source of nutrition of this river, which takes its source from springs emerging from the surface in the Chakhmag range of the Lesser Caucasus, is rainwater. Floods occur in the river during the spring-summer period when there is a lot of precipitation. Its basin covers an area of 536 km^2.

Guruchay – formed by the confluence of the Ishkhan and Ikah rivers, which take their source from

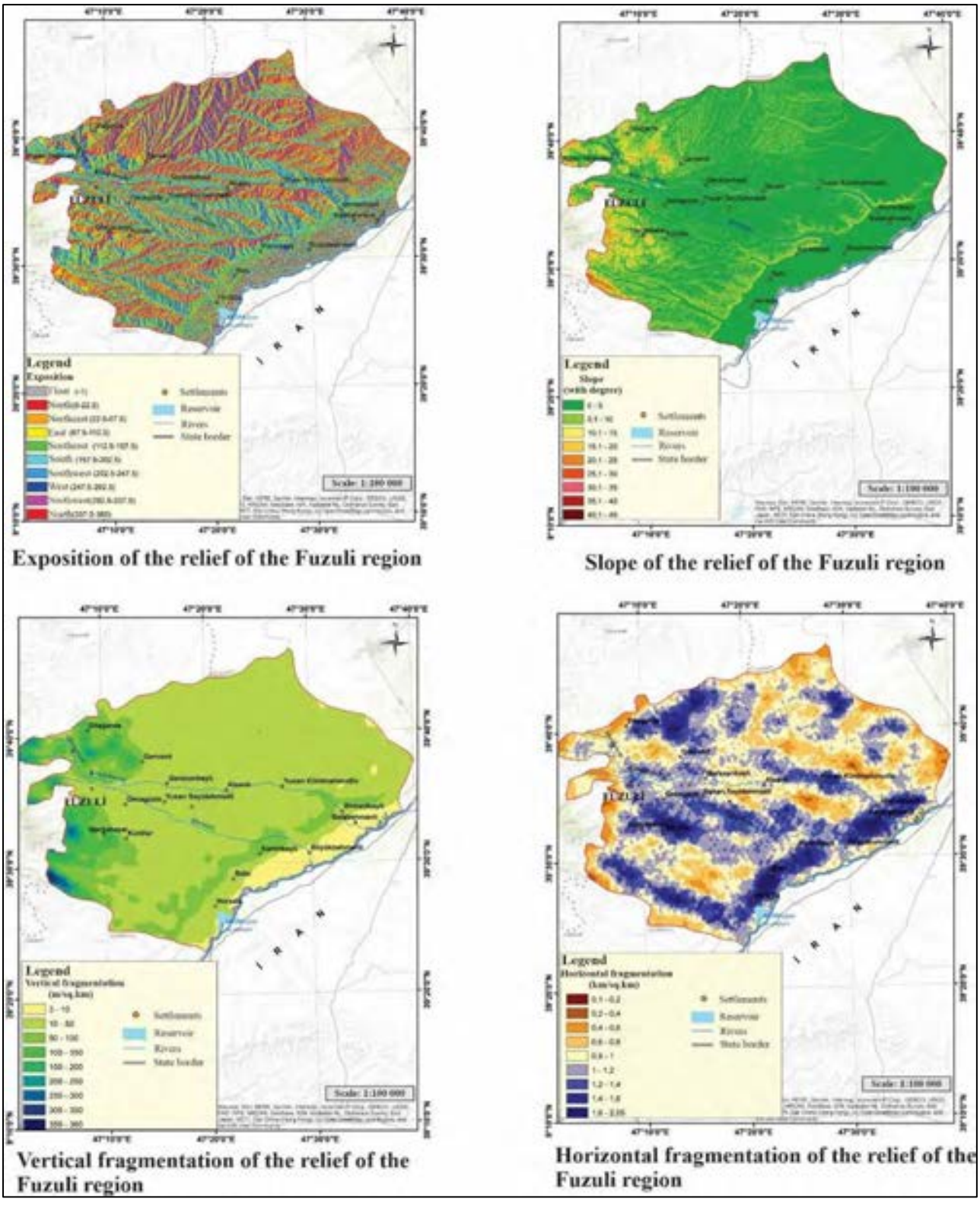
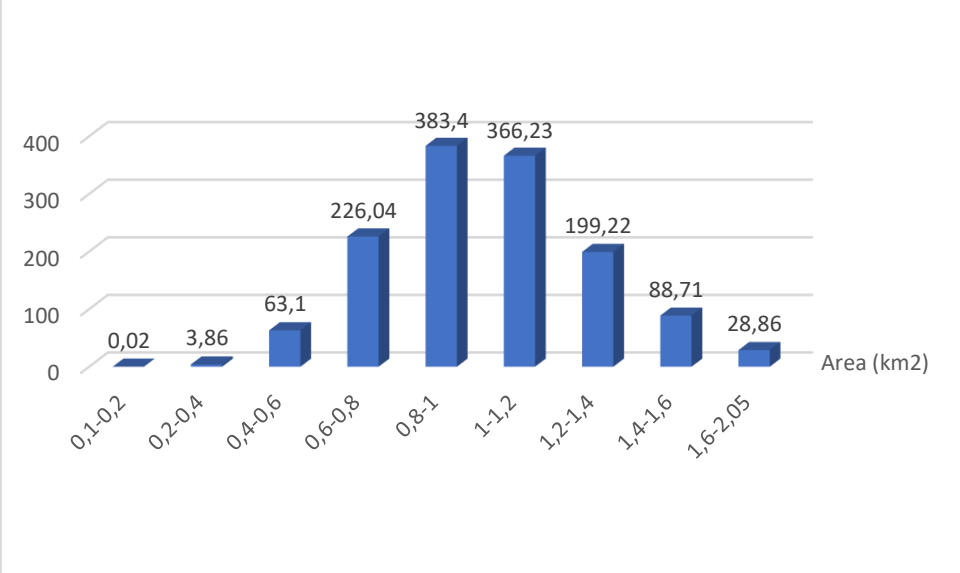


Fig. 3. Morphometric indicators (exposition of the relief, slope of the relief, vertical fragmentation of the relief, horizontal fragmentation of the relief) of the relief of the Fuzuli region (*Source:* The maps were prepared based on a digital model of the relief of the Fuzuli)

Table 1

Morphometric indicators of the relief

Horizontal fragmentation (km/km²)	Area (km²)	Vertical fragmentation (m/km²)	Area (km²)	Slope (with degree)	Area (km²)	Exposition	Area (km²)
0.1-0.2	0.02	3-10	83.46	0-5	1047,08	Flat	52.44
0.2-0.4	3.86	10-50	971.85	5.1-10	235,01	North	165.05
0.4-0.6	63.1	50-100	197.61	10.1-15	51,82	North-east	203.63
0.6-0.8	226.04	100-150	68.01	15.1-20	17,21	East	219.37
0.8-1	383.4	150-200	24.76	20.1-25	6,61	South-east	186.66
1-1.2	366.23	200-250	9.19	25.1-30	2,60	South	163.82
1.2-1.4	199.22	250-300	3.14	30.1-35	0,85	South-west	133.67
1.4-1.6	88.71	300-350	1.45	35.1-40	0,14	West	118.67
1.6-2.05	28.86	350-360	0.02	40.1-45	0.1	North-west	118.06



Graph. 1. Quantitative indicators of horizontal fragmentation (km/km²)

the Karabakh range. The Guruchay River, which is 82 km long and has a basin area of 512 km², plays an important role in irrigating agricultural fields in the study area and therefore cannot deliver its water to the Araz River. It is mainly fed by groundwater and its flood period is observed in April-May. Together with its two main branches and small branches, it significantly affects the increase in the amount of horizontal fragmentation of the area [14].

Gozluchay – It takes its source from the southeastern slope of the Lesser Caucasus at an altitude of 1520 m. This river, which does not have a constant flow, is partially used for irrigation during periods of heavy rainfall [14].

Analysis of the distribution of horizontal fragmentation over the territory shows that their quantitative changes are related to the lithomorphic base of the territory, the lithological composition of sediments and rocks, endodynamic factors, as well as climatic conditions of the territory, characteristics of precipitation distribution, inclination and orientation of slopes, changes in hypsometry over a large interval, etc. factors. Low fragmentation values correspond mainly to mountainous areas and areas with weak river network distribution, and are 0.1-0.6 km/km², covering 4.93% of the administrative region.

Vertical fragmentation. Among the morphometric characteristics of the relief, the indicators of vertical fragmentation (depth of fragmentation) are the most important, since they allow us to judge the general erosional fragmentation of the surface. Vertical fragmentation indicators are used in the study of erosion and other exodynamic processes, specific ecogeomorphological zoning, genetic reconstruction, and prediction of the state of the natural environment.

Vertical fragmentation is calculated according to the hypsometric differences of the area and the amount of fragmentation increases from plain to mountainous according to the relief of the administrative region. The amount of fragmentation is determined by the ratio of the difference between the

absolute height of the lowest point of a ravine, ravine, valley, etc. relief element falling on a unit area and the highest absolute value within that area.

As with horizontal fragmentation, there is a traditional method for calculating vertical fragmentation quantities. The fragmentation quantity is calculated according to the ratio of the difference between the absolute height of the lowest point of an erosional relief element such as a ravine, gully, valley, etc. falling on a single area on a topographic map and the highest absolute value within that area [17]:

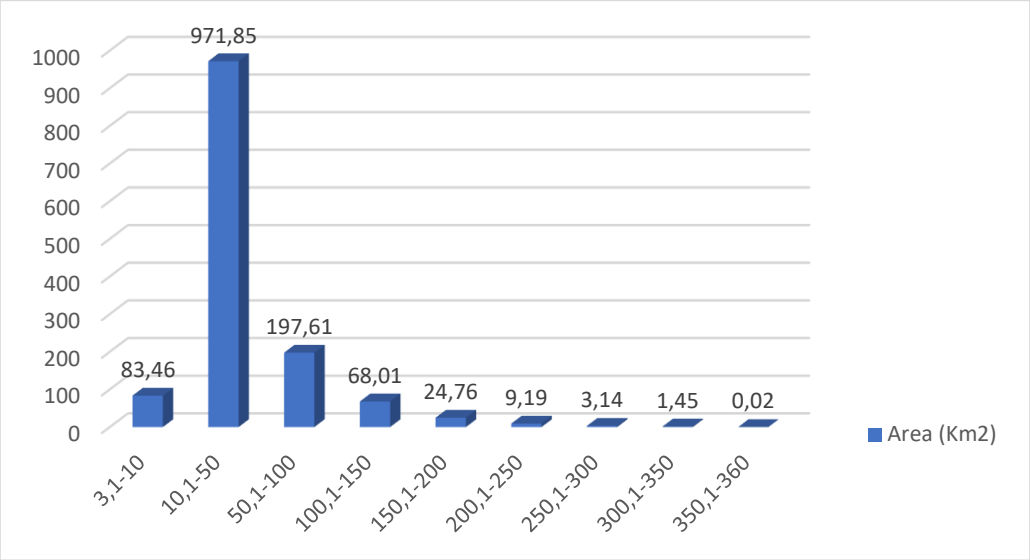
$$\Delta H = Hmax. - Hmin$$

Here H_{max} is the highest value within the square, H_{min} is the lowest value, ΔH is a quantitative indicator characterizing the depth of vertical fragmentation.

The vertical fragmentation map was prepared in Arcgis 10.8 based on Aster DEM. First, the heights of the area were calculated and divided into a 1 km² grid, and as a next step, the difference between the maximum and minimum heights per square was calculated. Analysis of the prepared map shows that the quantities are distributed regularly according to the positive and negative morphostructural elements of the area.

As a result of the measurement work, the amount of vertical fragmentation in the area was conditionally divided into 9 categories. High values of fragmentation and the distribution of isolines allow us to distinguish morphometrically tense areas. Since the hypsometric values of the studied area are low, vertical fragmentation is observed here in low values. Thus, the highest value of vertical fragmentation is 350-360 m/km² in the lowlands of the Karabakh ridge falling within the administrative region, and the lowest values are observed in the Araz-bound plains (3-10 m/km²) (Graphic 2).

In general, the amount of vertical fragmentation in 71.47% of the area varies between 10-50 m/km², which has a positive impact on the ecogeomorphological tension of the area.



Graph. 2. Quantitative indicators of vertical fragmentation (m/km²)

The surface slopes. One of the most important indicators of the relief is the inclination angles or slope of the slopes. The intensity and speed of the movement of soil masses, exogenous processes, surface and groundwater largely depend on the magnitude of the slope angles of the earth's surface. Depending on a number of features of the areas where the inclination of the slopes is observed, the spread of various types of slope processes can be observed here. Thus, at small inclination angles, as a rule, a slow mass displacement of the cover of destructive material is observed, which indicates the stability of the slopes; with increasing steepness, moving blocks and active deluvial washing processes begin to appear; in conditions of steep slopes, the main processes are essentially gravitational in nature (landslides, rock falls).

Slope is a quantitative indicator of the ratio of the height difference between the lowest and highest points of a slope to the distance between these points. The inclination of slopes, like topography and hypsometry, also plays an important role in the distribution of the relief and its elements. Information on the inclination of slopes is widely used in slope processes, engineering-geological surveys, earthworks, etc. Slope is mainly formed as a result of endodynamic processes, as well as denudation processes. Slope, one of the main morphometric indicators of the relief, is related to its height, degree of fragmentation, and the morphological characteristics of the tectonic and magmatic structures that make up the morphostructures.

The slope degree, which is considered one of the main indicators for all sectors of the economy,

like other morphometric indicators of the relief, determines the intensity of slope processes, the energy of the relief, the amount of solar energy, and the infiltration of atmospheric sediments.

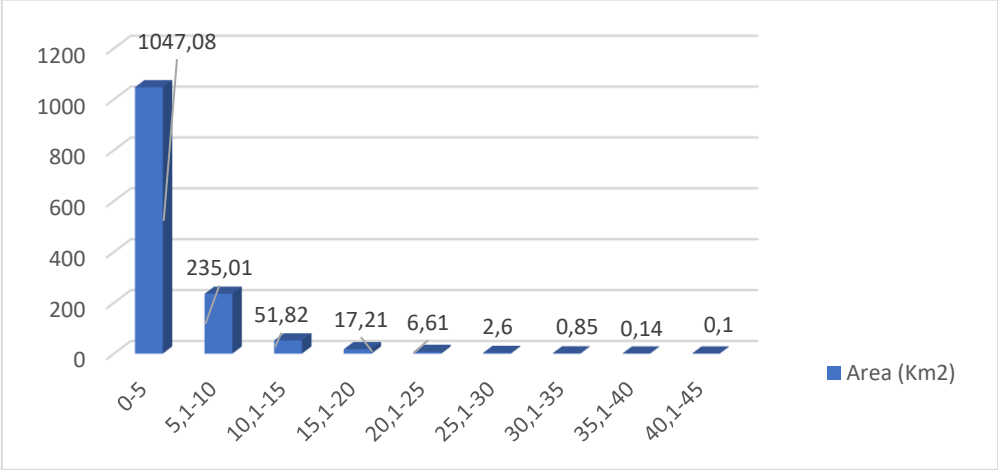
Inclination maps are traditionally prepared using various methods - the method of squares, the method of sliding circles, the method of morphographic surfaces. The inclination angles on the map are calculated using the following formula [17]:

$$i(\mathrm{tg}\alpha) = \frac{\mathrm{h}}{\mathrm{L}}$$

Where h is the cutting height (the maximum and minimum hypsometric difference of the slope), L is the distance between two horizontals. The larger the scale of the map to be prepared, the more accurate the value of the inclination angle will be. The preparation of inclination maps using the traditional method is very difficult, tedious and time-consuming.

The slope map of the area was prepared based on the Aster DEM model of the relief in the ArcMap 10.8 program.

Based on the conducted analyses, we can note that the values of the slope indicators of the territory mainly vary between 0^0-10^0, which indicates that there are favorable conditions for the use of the territory and the organization of the economy here. Thus, in areas with a slope of up to 10^0 (94.1%), irrigated agriculture and partially livestock breeding have developed (Graphic 3). In areas with a slope of 30^0-45^0 (0.1%), intensive erosion, denudation, a dense network of ravines and gobuses are characteristic, and they are suitable for livestock breeding, pasture-meadow, and terrace farming (2-3 m wide).



Graph. 3. Quantitative indicators of slope (with degree)

Generally, the indicated quantities are generalized indicators of the surface inclination in the altitude zones, in which high tension slopes are observed in mountainous areas with a high angle of inclination, and low tension slopes characterized by small indicators of the same quantity in the lowlands and plains. Undoubtedly, sometimes this regularity is violated.

Exposition. Exposition one of the main morphometric indicators, is of great importance in the formation of the plasticity of the relief and is considered one of the main factors affecting the bioclimatic characteristics of the area. Climatic indicators on the slopes, the uneven distribution of temperature, evaporation, solar radiation, precipitation and wind regimes, and changes in soil and plant cover depend on the exposure.

Thus, the uneven heating of slopes, depending on their exposition, affects the thermal regime of the soil cover, the species composition of plants, and indirectly, the increase or decrease in productivity.

Due to the diversity of solar radiation and moisture, the vegetation cover on northern and western-facing slopes is dense and rich, while on southern and eastern slopes, on the contrary, it is sparse and characterized by a poor species composition.

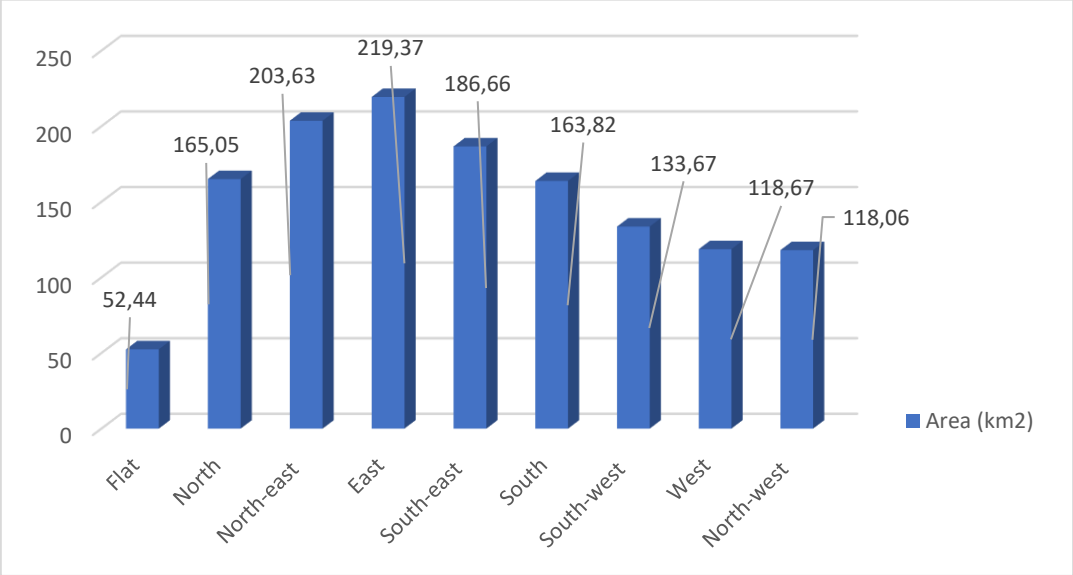
The factor determining the exposition is related to the orientation of morphostructures that complicate the relief, their morphological and also fragmentation characteristics, where rivers and their flow direction play an important role. The density of the river network in the area significantly increases the fragmentation of slopes, and in connection with this, the orientation of the slopes also increases. A number of exodynamic processes also occur with varying intensity depending on the orientation of the slopes, mainly developing relatively strongly on the slopes facing south, so such slopes also have relatively high stress.

When measuring the slope using the classical method, the following steps are performed: the boundary of the slopes (watershed and valley-ravine network) is marked on a 1:100.000 scale topographic map; within each slope, perpendicular lines are drawn from the watershed to the river valley, their azimuth or rhumb are measured with a protractor,

and a map is drawn based on the results obtained [17]. A comprehensive study of slope is of great practical importance, as it affects all areas of the national economy. In the research work, slope was developed in the ArcMap 10.8 program. Analysis of the measurement work shows that the north-east and east-facing slopes dominate in the area and cover 31% of the area. On the contrary, the north-west-facing slopes cover a very small area, only 8.7%, that is, 118.06 km² of the area (Graphic 4).

The northern-facing slope of the area is characterized by a decrease in solar radiation and dense vegetation in the low-mid-mountainous areas, while the northeastern and eastern slopes are characterized by a relative decrease in solar radiation and relatively dense vegetation. The southeastern and southern-facing slopes are characterized by intense solar radiation, erosion, and the resulting weak vegetation, and bare rocks. For the western and northwestern-facing slopes, a significant decrease in solar radiation, dense vegetation, and weak erosion are typical.

The south-southwest-southeast slopes of the area are more exposed to the influence of dry air currents than the other slopes, and in this regard, the ecogeomorphological tension is assessed with a higher score.



Graph. 4. Quantitative indicators of exposition

Thus, the analysis of morphometric indicators plays a key role in the ecogeomorphological assessment and zoning of the relief, being of great importance in assessing the geodynamic stress of the area and identifying the factors that cause it.

The morphometric indicators (slope inclination and exposure, degree of horizontal and vertical fragmentation), which play a key role in the formation of the ecogeomorphological characteristics of the relief of the Fuzuli administrative region, have a significantly different nature. Each of them individually affects the ecogeomorphological tension in different ways. Thus, the amount of horizontal and vertical fragmentation affects the stability and dynamics of the relief, the exposure of the slopes affects the distribution of solar radiation, humidity, and consequently the density and productivity of the vegetation cover, the intensity of the slope processes, the diversity of the physical and chemical properties of the soil cover, and thus the ecogeomorphological conditions, etc.

Conclusion. Thus, based on morphometric data, along with the study of the regularities of the development of the relief, the features of the manifestation of endogenous and exogenous morphogenesis processes, ecogeomorphological tension areas were determined. The use of these data in the study of endo- and exodynamic stress of the relief, and thus in the determination of territorial planning, was shown.

During the preparation of the ecogeomorphological tension, as indicated in the methodology, the maps of horizontal fragmentation, vertical fragmentation, slope inclination and exposure were superimposed and high values were matched with low values, appropriate zones were separated, and the area of each zone was calculated.

A map was compiled to assess the relief based on morphometric indicators and the area was divided into 3 tension zones: low tension, medium tension and high tension. In the compiled map, low tension areas correspond to low tension areas and high tension areas correspond to high tension areas, and are evaluated with appropriate scores. On the map, low tension areas are shown in green, medium tension and high tension areas are shown in yellow and orange tones (Figure 4).

Assessment of ecogeomorphological conditions is extremely important for determining areas suitable for human settlement, the use of the land surface

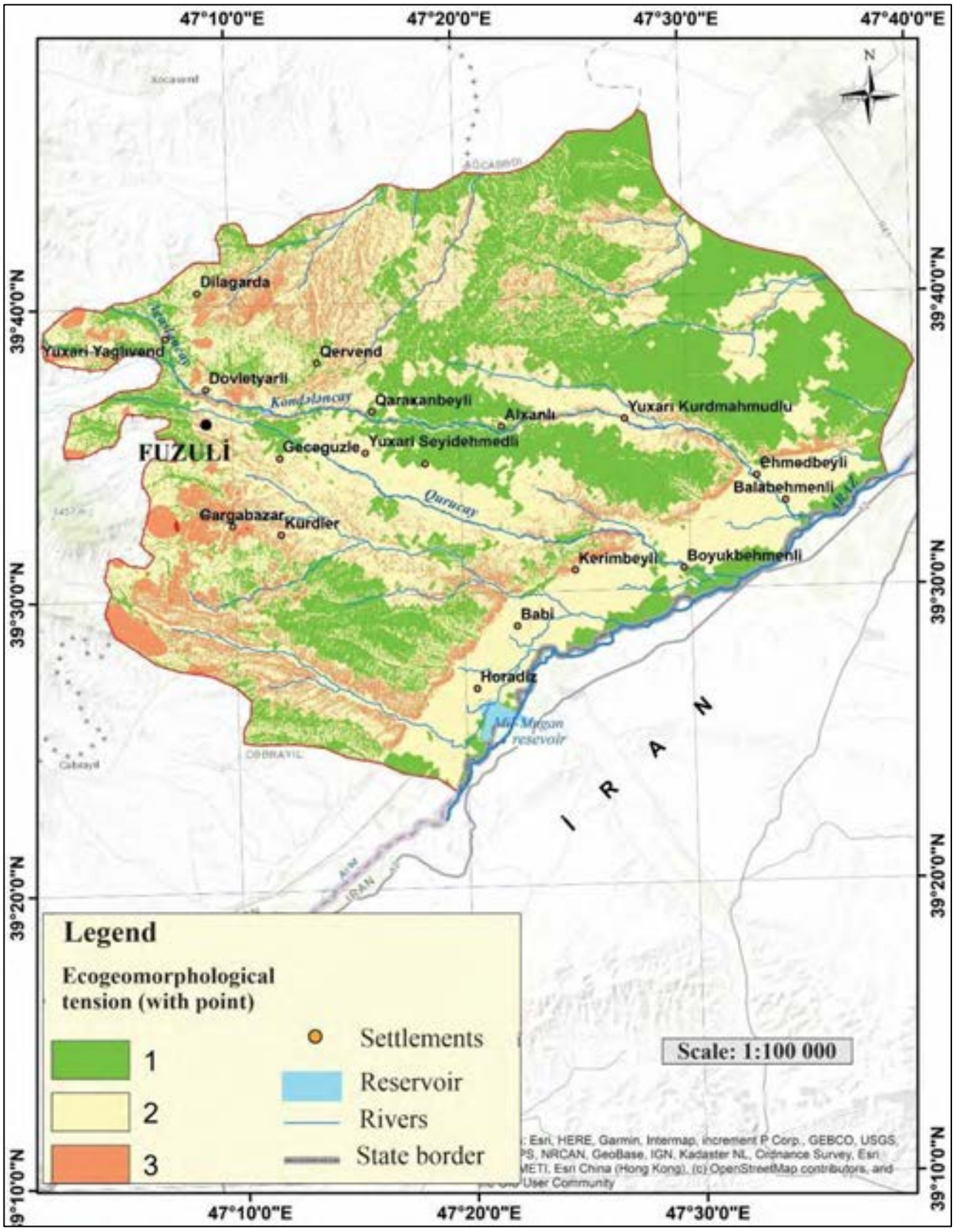


Fig. 4. Map of assessment of ecogeomorphological tension based on morphometric indicators of the relief of the Fuzuli administrative region

Table 2

Assessment of ecogeomorphological tension of the Fuzuli administrative region based on morphometric indicators of its relief

Morphometric indicators of the relief				Ecogeomorphological tension zone (point)	Area	
Vertical fragmentatio	Horizontal fragmentation	Surface slope	Exposition		Km²	%
3-10 m/km²	0.1-0.2 km/km²	0^0-5^0	Flat	Weak (1)	501,13	36,98
10-50 m/km²	0.2-0.4 km/km²	5.1^0-10^0	North			
50-100 m/km²	0.4-0.6 km/km²	10.1^0-15^0	North-east			
100-150 m/km²	0.6-0.8 km/km²	15.1^0-20^0	East	Mild (2)	696,66	51,41
150-200 m/km²	0.8-1 km/km²	20.1^0-25^0	South-east			
200-250 m/km²	1-1.2 km/km²	25.1^0-30^0	South			
250-300 m/km²	1.2-1.4 km/km²	30.1^0-35^0	South-west	High (3)	157,36	11,61
300-350 m/km²	1.4-1.6 km/km²	35.1^0-40^0	West			
350-360 m/km²	1.6-2.05 km/km²	40.1^0-45^0	North-west			

relief for recreation and tourism, and the location of industrial enterprises.

Summarizing the conducted analyses, we can note that a high correlation was found between the horizontal and vertical distribution of the relief, as well as the inclination and exposure of the slopes, and the height of the relief obtained as a result of their interpolation, and the ecogeomorphological tension.

The measurements show that low-tension areas cover an area of 501.13 km², medium-tension areas cover an area of 696.66 km², and high-tension areas cover an area of 157.36 km² (Table 2). Based on these indicators, it can be noted that the administrative region is ecogeomorphologically favorable and its vast territory is suitable for land use. Only 11.61% of the area has high tension, which makes it possible to use these areas as pastures.

Generally, the results of the assessment of ecogeomorphological tension based on the morphometric analysis of the relief and the compiled map data can be used in various fields of industry and agriculture, in the construction of economic facilities, communication systems, etc.

Bibliography

1. *Abuşova, S. N. (2015). Ekogeomorfoloji qiymətləndirmə məqsədilə relyefin morfometrik göstəricilərinin təhlili. Coğrafiya və təbii resurslar, (2), 41–45.*
2. *Əlizadə, E. K., Tanrıverdiyev, X. K., Xəlilov, H. A., və digərləri (2014). Geomorfoloji rayonlaşdırma. Azərbaycan Respublikasının coğrafiyası (Cild 1, Fiziki coğrafiya) Bakı: Avropa, 127–132*
3. *Bogale, A. (2021). Catchment morphometric analysis using geographic information system in Gilgel Abay watershed, Lake Tana Basin, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. Applied Water Science, 11, 121–127. https://doi.org/10.1007/s13201-021-01447-9*
4. *Clarke, J. J. (1966). Morphometry from maps. In Essays in geomorphology, Elsevier Press. 235–274*
5. *Eminov, Z. N. (Baş redaktor). (2021). Qarabağ və Şərqi Zəngəzurun coğrafiyası: Təbii-coğrafi şərait və sosial-iqtisadi inkişaf potensialı, Bakı: Elm, 536*
6. *Gasimov, J. Y. (2023). Defining the specific weights of morphometric indicators of relief for the evaluation of the ecological-geomorphological condition: A case study of the eastern part of the Kura depression. In Proceedings of the 6th Intercontinental Geoinformation Days (IGD), Baku, 341–344*
7. *Халилов, Г. А. (1999). Морфоструктуры восточной части Малого Кавказа (Анализ рельефа: вопросы теории и практики), Баку, 277.*
8. *Xəlilov, H. A. (2010). Talış dağlıq sistemində relyefin mühit əmələgətirici funksiyası haqqında (tədqiqatın ekogeomorfoloji aspekti). AMEA Xəbərləri, Yer elmləri, (2), 24–27.*
9. *Khaitov, B. (2023). Study of morphometric relief indicators for the problems of engineering preparation of territories. The Saybold Report, Baltimore, 1823–1829. https://doi.org/10.33552/CTCSE.2019.02.000533*
10. *Халилов, Г. А. (1985). О роли магматизма в формировании морфоструктур. Доклады АНАзерб. ССР. Сер. Наук о Земле. (6), 51–54.*
11. *Khalilov, G. A. (2003). The concept of terrain planning and the problem of leveling the surface of mountain structures. Geomorphology, (1), 93–103.*
12. *Мамедов, А.В. (1977). История геологического развития и палеогеография Среднекуринской впадины в связи с нефтегазоностью, Баку: Элм, 212.*

13. *Мамедов, С. Г. (2007). Эколого-геоморфологические особенности бассейнов Гирдыманчая и Вельвеличая и их анализ в ГИС - формате. Баку, 139.*
14. *Məmmədov, M. A. (2012). Azərbaycanın hidroqrafiyası. Bakı: Təhsil, 253*
15. *Məmmədov, R. M. (Baş redaktor). (2014). Azərbaycan coğrafiyası (Cild 1). Bakı: Avropa, 529*
16. *Mokanu, S., Tsiupa, I., & Lyashenko, D. (2023). Mapping morphometric indicators and GIS-based relief analysis of a ravine in Holosiivskyi district, Kyiv. In Proceedings of the Fourth EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities, 1–5 https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023500030*
17. *Пириев, Р. Х. (1986). Методы морфометрического анализа рельефа (На примере территории Азербайджана). Баку «Элм», 120*
18. *Panizza, M. (2006). Geomorphological hazards and environmental impact: Assessment and mapping. In Planning the use of the Earth's surface, 101–123 0.1007/BFb0038633*
19. *Różycka, M., & Migoń, P. (2021). Morphometric properties of river basins as indicators of relative tectonic activity. Geomorphology, 389, 107807. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107807*
20. *Шехунова, С. Б., Сюмар, Н. П., Лобасов, О. П., Стадніченко, С.М. (2022). Аналіз просторових закономірностей поширення зсувів у межах Закарпатської області засобами ГІС. Природничо-географічні дослідження, 3(119), 11–20. https://doi.org/10.15407/ugz2022.03.011*
21. *Silero-Medina, J. A., Perez-González, M. E., Martinez-Murillo, J. F., & Ruiz-Sinoga, J. D. (2020). Factors influencing ecological-geomorphological dynamics in two contrasting Mediterranean settings. Geomorphology, 352, 106–118. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106996).*

References

1. *Abushova, S. N. (2015). Study of morphometric factors of ecogeomorphological estimation of the relief of north-eastern slope of the Lesser Caucasus. Geography and Natural Resources, (2), 41–45. [in Azerbaijani]*
2. *Alizade, E. K., Tanriverdiyev, X. K., Khalilov, H. A., et al. (2014). Geomorphological zoning. In Geography of the Republic of Azerbaijan (Vol. 1, Physical geography) Baku: Europe, 127–132 [in Azerbaijani]*
3. *Bogale, A. (2021). Catchment morphometric analysis using geographic information system in Gilgel Abay watershed, Lake Tana Basin, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. Applied Water Science, 11, 121–127. https://doi.org/10.1007/s13201-021-01447-9*
4. *Clarke, J. J. (1966). Morphometry from maps. In Essays in geomorphology, Elsevier Press. 235–274*
5. *Eminov, Z. N. (Ed.). (2021). Geography of Karabakh and Eastern Zangezur: Natural-geographical conditions and socio-economic development potential. Baku: Elm, 536 [in Azerbaijani]*
6. *Gasimov, J. Y. (2023). Defining the specific weights of morphometric indicators of relief for the evaluation of the ecological-geomorphological condition: A case study of the eastern part of the Kura depression. In Proceedings of the 6th Intercontinental Geoinformation Days (IGD), Baku, 341–344*
7. *Khalilov, G. A. (1999). Morphostructures of the eastern part of the Minor Caucasus (Relief analysis: theory and practice). Baku, 277*
8. *Khalilov, H. A. (2010). Environmental formation function of relief in the Talysh mountain system. Proceedings of ANAS, Earth Sciences, (2), 24–27. [in Azerbaijani]*
9. *Khaitov, B. (2023). Study of morphometric relief indicators for the problems of engineering preparation of territories. The Saybold Report, Baltimore, 1823–1829 10.33552/CTCSE.2019.02.000533*
10. *Khalilov, G. A. (1985). About the role of magmatism in the formation of morphostructures. Doklady AN Azerbaijan. Earth Sciences, (6), 51–54.*
11. *Khalilov, G. A. (2003). The concept of terrain planning and the problem of leveling the surface of mountain structures. Geomorphology, (1), 93–103.*
12. *Mamedov, A. V. (1977). History of geological development and paleogeography of the Middle Kura depression in connection with oil and gas. Baku: Elm, 212*
13. *Mamedov, S. G. (2007). Ecological and geomorphological features of the Girdimanchay and Velvelichay river basins and their analysis in GIS format. Baku, 139*
14. *Mammadov, M. A. (2012). Hydrography of Azerbaijan. Baku, 253 [in Azerbaijani]*
15. *Mammadov, R. M. (Ed.). (2014). Geography of the Azerbaijan Republic (Vol. 1). Baku: Avropa press, 529 [in Azerbaijani]*
16. *Mokanu, S., Tsiupa, I., & Lyashenko, D. (2023). Mapping morphometric indicators and GIS-based relief analysis of a ravine in Holosiivskyi district, Kyiv. In Proceedings of the Fourth EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities, 1–5 https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023500030*
17. *Piriyev, R. Kh. (1986). Methods of morphometric analysis of relief. Baku: Elm, 120 (In Russian)*
18. *Panizza, M. (2006). Geomorphological hazards and environmental impact: Assessment and mapping. In Planning the use of the Earth's surface, 101–123 0.1007/BFb0038633*
19. *Różycka, M., & Migoń, P. (2021). Morphometric properties of river basins as indicators of relative tectonic activity. Geomorphology, 389, 107807. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107807*
20. *Shekhunova, S. B., Siumar, N. P., Lobasov, O. P., & Stadnichenko, S. M. (2022). Analysis of spatial patterns of landslide formation with GIS tools. Ukrainian Geographical Journal, 3(119), 11–20. [in Ukrainian] https://doi.org/10.15407/ugz2022.03.011*

21. Silero-Medina, J. A., Perez-González, M. E., Martinez-Murillo, J. F., & Ruiz-Sinoga, J. D. (2020). Factors influencing ecological-geomorphological dynamics in two contrasting Mediterranean settings. Geomorphology, 352, 106–118. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106996

Роль морфометричних показників рельєфу в оцінці екогеоморфологічних умов Фізулінського адміністративного району

Саміра Абушова
д. філософії (геоморфологія), ст. наук. співробітник
кафедри геоморфології та палеогеографії,
Міністерство науки і освіти РА, Інститут географії
ім. академіка Гасана Алієва, Баку, Азербайджан

При оцінці екогеоморфологічних умов морфометричні показники рельєфу (такі як нахил, перепади висот, горизонтальна та вертикальна фрагментація, експозиція тощо) дозволяють визначити інтенсивність природних процесів та особливості формування екологічного ризику в межах території. У статті аналізуються морфометричні показники та екогеоморфологічна оцінка рельєфу Фізулинського адміністративного району. Характеристика морфометричних параметрів рельєфу включає кількісні показники ступеня складності формування рельєфу земної поверхні. Морфометричні показники, що визначають коефіцієнт складності рельєфу земної поверхні, відіграють важливу роль у виконанні інженерних робіт, а також у територіальному плануванні. Величини морфометричних показників були розраховані на основі цифрової моделі рельєфу (Aster DEM) Азербайджану та інтерпольовані в програмному забезпеченні Arcmap 10.8 для визначення ступеня напруженості території. Відповідно до екогеоморфологічної напруженості, досліджувана територія була розділена на 3 зони та наведено морфометричні значення кожної зони. Було визначено, що 36,98% території Фізулінського адміністративного району має сприятливі умови для будівництва інфраструктури. Визначення ступеня екогеоморфологічної напруженості території на основі морфометричних показників рельєфу дозволяє виявити території з високою схильністю до природних процесів та оцінити потенційні екологічні ризики. Дослідницькі карти, створені за допомогою проекційної системи Меркатора, були геоприв'язані та вирівняні з системою координат WGS 1984 UTM Zone 38N. На основі цифрової моделі рельєфу було проаналізовано, кількісно визначено морфометричні показники рельєфу (горизонтальна та вертикальна фрагментація, нахил, експозиція) та визначено ступінь екогеоморфологічної напруженості за допомогою методу інтерполяції в програмі ArcMap. Досліджувана територія складається з 501,13 км² низьковольтної, 696,66 км² середньовольтної та 157,36 км² високовольтної територій, які переважно придатні для землекористування. Лише 11,61 відсотка площі має високу напругу, що дозволяє використовувати ці території як пасовища, а також для туристичних цілей. На цих територіях можна здійснювати різноманітну туристичну та рекреаційну діяльність, включаючи піші прогулянки, альпінізм та інші види активного відпочинку на природі, використовуючи переваги природного ландшафту та мальовничих особливостей рельєфу.

***Ключові слова**: горизонтальна фрагментація, вертикальна фрагментація, нахил, експозиція, екогеоморфологічна напруженість, територіальне планування, екзодинамічні та ендодинамічні процеси, морфометричні показники.*

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу
Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 1 травня 2025 р.
Прийнята 10 вересня 2025 р.

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-37
UDC 574.6:628.16
Received 3 July 2025
Accepted 17 November 2025

Chlorine residual behavior in water disinfection using combined sand media with chlorine application

Rezania Asyfiradayati [1]
Lecturer, Department of Public Health,
[1] University Muhammadiyah Surakarta, Surakarta, Indonesia,
e-mail: ra123@ums.ac.id, https://orcid.org/0000-0002-1507-5158;
Windi Wulandari [1]
Lecturer, Department of Public Health,
e-mail: ww122@ums.ac.id, http://orcid.org/0009-0002-4485-4625;
Jenita Berlian N [1]
Student, Department of Public Health,
e-mail: berlianjenita@gmail.com, https://orcid.org/0009-0008-1811-0802;
Siti Rohana Mohd Yatim [2]
Lecturer, Faculty of Health, [2] University Technology MARA, Selangor, Malaysia,
e-mail: sitirohana@uitm.edu.my, https://orcid.org/0000-0002-9714-6203

ABSTRACT

Introduction. Water is a need for every human being in all parts of the world. The demand for water, particularly clean water, is expected to increase in line with population growth. In Indonesia, wells providing access to both shallow and deep groundwater sources serve as the primary source of clean water Microbiological contamination of water causes a bad impact, especially on health. The water supply system is a fundamental component of sustainable urban development. Nevertheless, it frequently encounters a range of complex challenges, especially in developing nations.

The purpose of article. The objective of this study is to investigate the concentration of residual chlorine over varying contact times using different media combinations, namely black sand, silica sand, and white sand, to evaluate their effectiveness in sustaining chlorine levels during water treatment.

Research methods. This research employed a quasi-experimental design to evaluate residual chlorine levels in treated water using various types of sand integrated with chlorine within diffuser pipes. A total of 720 liters of water was used, divided into 36 reservoirs. holding 2.5 mg of chlorine each of which contained 20 litres and 500 grams of one of three types of sand: black sand, white sand, or silica sand. Water samples in 20-litre containers were treated with a chlorine sprayer for exposure periods of 30, 45, and 60 minutes. The study assessed several parameters, including temperature, pH, total dissolved solids (TDS), and residual chlorine. Data were analyzed and presented using univariate and bivariate tables, with statistical testing conducted using one-way ANOVA.

Result. The results indicated that the chlorine diffuser containing white sand exceeded the permissible residual chlorine threshold at contact times of 45 and 60 minutes. Statistical analysis using one-way ANOVA revealed a significant difference in residual chlorine concentrations between the silica sand and black sand media ($p < 0.05$). However, no statistically significant difference was observed in the chlorine concentrations over time for the white sand diffuser. These findings suggest that white sand may lead to prolonged chlorine retention, potentially resulting in concentrations above recommended limits

Scientific novelty and practical value. for the first time, an analysis that the various types of sand in the chlorine diffuser have differences in the remaining chlorine in the water so that it can be used as a reference for further research in water treatment.

Keywords: *chlorine residue, silica sand, white sand, black sand, safety drinking water, disinfection, chlorine, media combination.*

In cites: Asyfiradayati Rezania, Windi Wulandari, Jenita Berlian N., Mohd Yatim Siti Rohana (2025). Chlorine residual behavior in water disinection using combined sand media with chlorine application. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 507-515. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-37

Introduction

Indonesia, as a tropical nation, possesses rich water resources that include rivers, lakes, reservoirs, swamps, and floodplains [1]. Indonesia, similar to other nations in the Asia-Pacific region, pays great attention to the effects of climate instability, population increase, and human activities on the degradation of water resources and the loss of biodiversity. Therefore, understanding the interactions between biological and hydrological processes, as well as focusing on reducing ecological threats and enhancing harmony within catchment areas, is essential to promote the sustainability of water resources, biodiversity, and environmental ecosystems. The demand for water, particularly clean water, is expected to increase in line with population growth. Water supply in Indonesia fluctuates with the seasons, and its distribution varies from region to region. Generally, most parts of Indonesia have annual rainfalls of about 2000 to 3500 mm (60%). A few areas (3%) have annual rainfalls higher than 5000 mm, while others have less than 1000 mm per year [2].

Survival for humans relies on having access to clean water. According to the World Health Organization, approximately 2.2 billion individuals lack access to safely managed drinking water [3] [4].

© Asyfiradayati Rezania, Windi Wulandari, Jenita Berlian N., Mohd Yatim Siti Rohana, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Effective water management is a significant global issue because of its direct impact on human health outcomes. Various studies in Indonesia have demonstrated that microbiological contamination of clean water, particularly by indicator bacteria such as *coliform* and *Escherichia coli*, represents a serious issue that poses a significant threat to public health. The combination of dense population and dependence on shallow wells poses challenges, as only about 19.83% of residents have access to piped water, whereas around 79.53% still rely on privately owned wells. *Escherichia coli* (E. coli) arises from fecal contamination routes that deteriorate the microbial quality of water in household environments [5]. Pathogens transmitted through water, derived from human and animal excreta, can infiltrate drinking water systems via contamination of surface or groundwater sources. This type of microbial pollution presents serious public health hazards, such as gastrointestinal and respiratory infections, viral hepatitis, skin diseases, pregnancy complications, and, in severe instances, death [6].

Significant progress in various urban sectors notwithstanding, cities still encounter substantial and complex water provision challenges. Interventions aimed at hygiene, sanitation, and clean water delivery have demonstrated effectiveness in easing the disease burden. Worldwide, major cities are struggling to meet a persistent demand for clean water that is escalating [7]. According to Indonesian Regulation No. 492/Menkes/PER/IV/2010, the acceptable level of free chlorine in water supply systems ranges from 0.2 to 0.5 mg/L as stipulated by the Ministry of Health [8]. In Central Java Province, 75.88% of households have access to sufficient drinking water sources, whereas 24.2% of the population still does not have access to suitable drinking water sources [9].

Alongside the use of disinfectants, boiling is an effective method for improving water quality. A decrease in the Most Probable Number (MPN) in sampled water indicates that boiling can substantially enhance the microbiological purity of groundwater [10]. Previous research has found that latrines which do not meet health standards may lead to higher Escherichia coli (E. coli) levels in water bodies. The main source of bacterial contamination is not the state of the toilets themselves but rather the poor management of wastewater disposal systems [11].

In Indonesia, wells providing access to both shallow and deep groundwater sources serve as the primary source of clean water. Contaminated water containing chemical or biological agents is a substantial medium for the transmission of waterborne diseases [12]. Households in the studied area have access to improved drinking water sources, indicating that most households obtain water that meets basic hygiene and health standards. However, only approximately 31.3% of households have access to drinking water free from Escherichia coli contamination. Furthermore, merely 11.9% of households have access to drinking water classified as safe based on combined parameters, which include assessments of E. coli presence and heavy metal concentrations in the water [13]. Infections caused by contaminated water sources, resulting from human or animal fecal matter, can cause acute health issues affecting the digestive and respiratory systems, as well as hepatitis, dermatitis, growth stunting in pregnant women, and potentially life-threatening outcomes [12,14,15][3][6]. Clean water contamination has been detected at the household level, specifically within domestic residences. Previous research in Kartasura District found that four out of eight types of housing were contaminated with Coliform bacteria, and two showed contaminations with E. coli.[16]. Rainwater contamination with coliform bacteria has also been identified, making caution necessary before using it [17].

Water distribution systems' residual chlorine levels can be considered a reliable indicator of microbiological contamination [18]. Applying chemical disinfectants, particularly chlorine, is a proven way to decrease microbial numbers. Chlorine is commonly used in developing countries because of its effectiveness and affordable cost [19]. Chlorine is readily available and cost-effective as a chemical agent, enabling its use by local communities [20]. Water treatment entities, including PDAM, and water utilities have widely utilised chlorination. Considering the widespread reliance on well water among Indonesian families, a need exists to develop innovative chlorination techniques suitable for household use. Chlorine diffuser design must take into account residual chlorine levels, piping specifications, including diameter as described [21], and the incorporation of additional materials to neutralise chlorine residues, which optimises water treatment processes as per [22]. According to Clayton et al. (2021), chlorine is considered safe for reducing biological contaminants in drinking water. Regulations necessitate residual chlorine levels to comply with Indonesian Regulation No. 492/Menkes/PER/IV/2010 in order to avert negative impacts on public health [23].

Materials frequently used for the decomposition of chlorine residues include granular media like silica sand (SiO_2), white sand, and black sand. The selection of sand-based materials is based on their natural richness in reactive mineral components, such as amorphous silica and iron oxides, which promote redox reactions that neutralize remaining oxidizing agents [24]. Previous studies have demonstrated varying effectiveness in reducing coliform

concentrations across different sand types [25], thereby highlighting the need for a systematic comparative analysis to quantify the residual chlorine remaining in treated water following the application of the chlorine diffuser method. This research is notable for shedding light on the effects of chlorine levels in drinking water that has been treated with chlorine and different types of sand. The primary aim of this research is to investigate differences in residual chlorine levels in water disinfected with chlorine, combined with various types of sand. There is a need for alternative materials capable of decomposing residual chlorine in water to optimize the chlorination treatment process. Various materials can be employed for chlorine residue removal, including silica sand and black sand. Sand is selected due to its natural content of reactive minerals, such as silica and iron, which contribute to the breakdown of residual chlorine through redox reactions [22].

Method

This study employed a quasi-experimental design and was carried out with the approval of the Ethics Committee of the Faculty of Health Sciences, Universitas Muhammadiyah Surakarta, under reference number 667/KEPK-FIK/XI/2024. The study population consisted of all water sourced from the Pabelan Kartasura Sukoharjo Village area. A total sample of 720 litres of water was distributed across 36 reservoirs, each of which contained 20 litres. A 100 ml water sample was taken from each reservoir, placed in a sterilized bottle, stored in a cool box, and transported to the Microbiology Laboratory at the Faculty of Health Sciences, UMS, for examination. The parameters assessed included temperature, pH, total dissolved solids (TDS), and residual chlorine concentrations.

The study utilised 2-inch diameter pipes as containers for chlorine and sand, featuring evenly spaced perforations along their length, holding 2.5 mg of chlorine each of which contained 20 litres and 500 grams of one of three types of sand: black sand, white sand, or silica sand. Water samples in 20-litre containers were treated with a chlorine sprayer for exposure periods of 30, 45, and 60 minutes. Chemical properties in water samples were examined by placing them in test tubes. Temperature was measured with a digital thermometer, while pH and residual chlorine levels were tested using pH and chlorine test kits. The levels of residual chlorine were then measured using a DR 1500 spectrophotometer. The data were compiled in tables showing one variable and two variables, with statistical analysis conducted using the one-way analysis of variance (ANOVA) method.

Result

The remaining chlorine is present at the time of use of chlorine diffuser with various types of sand. The chlorine diffuser supplemented with various types of sand exhibited different residual chlorine concentrations over time at 0, 30, 45, and 60 minutes. Detailed results are presented in Table 1 and Figure 1.

Table 1

Mean of chlorine residue

	Time (minute)	N	Mean of Chlorine residue	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Min	Max
						Lower Bound	Upper Bound		
Chlorine residue using chlorine diffuser w/ silica sand	0	5	0.5233	0.23116	0.13346	-0.0509	1.0976	0.38	0.79
	30	5	0.4033	0.03786	0.02186	0.3093	0.4974	0.36	0.43
	45	5	0.2800	0.11269	0.06506	0.0001	0.5599	0.15	0.35
	60	5	0.2867	0.10116	0.05840	0.0354	0.5380	0.17	0.35
	Total	20	0.3733	0.15796	0.04560	0.2730	0.4737	0.15	0.79
Chlorine residue using chlorine diffuser w/ black sand	0	5	0.4933	0.17388	0.10039	0.0614	0.9253	0.36	0.69
	30	5	0.3467	0.02309	0.01333	0.2893	0.4040	0.32	0.36
	45	5	0.3000	0.04583	0.02646	0.1862	0.4138	0.26	0.35
	60	5	0.2933	0.04933	0.02848	0.1708	0.4159	0.26	0.35
	Total	20	0.3583	0.11622	0.03355	0.2845	0.4322	0.26	0.69
Chlorine residue using chlorine diffuser w/ white sand	0	5	0.4067	0.09074	0.05239	0.1813	0.6321	0.34	0.51
	30	5	0.3267	0.01155	0.00667	0.2980	0.3554	0.32	0.34
	45	5	0.3233	0.03215	0.01856	0.2435	0.4032	0.30	0.36
	60	5	0.3200	0.02646	0.01528	0.2543	0.3857	0.30	0.35
	Total	20	0.3442	0.05712	0.01649	0.3079	0.3805	0.30	0.51

The findings of this study revealed that the residual chlorine concentration in the chlorine diffuser incorporating silica sand was lower compared to that in diffusers supplemented with white or black sand, although the observed differences were not statistically substantial.

Clean water must contain residual chlorine to ensure its quality and safety during distribution prior

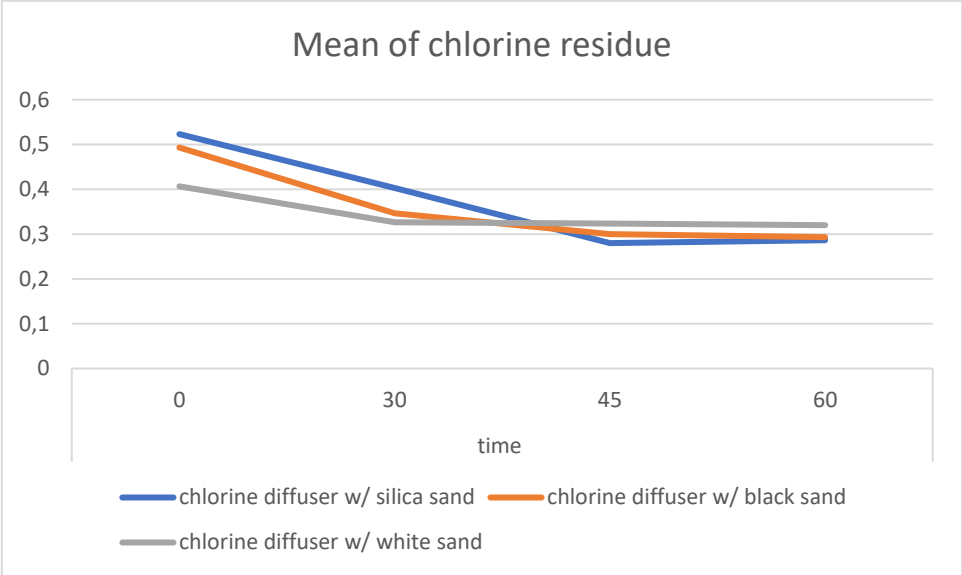


Fig. 1. Mean of Clhorine residue

to consumer use. According to the World Health Organization and the Indonesian Ministry of Health Regulation No. According to the 2023 guidelines regarding Sanitation Regulations, the minimum level of free chlorine residue in water must be between 0.2 mg/L and 0.5 mg/L in order to achieve effective disinfection without posing a health risk. The results indicated that the chlorine diffuser, utilising white sand at 45 minutes and 60 minutes, exceeded the allowable limit. Residual chlorine plays a crucial role in ensuring the microbiological safety of water because it can safeguard the water distribution system from being compromised and prevent recontamination when the water is initially clean.

Table 2

Statistically Significant Difference in Residual Chlorine

		ANOVA Number of Squares	Df	Square Average	F	Sig.
Chlorine residue using chlorine diffuser w/ silica sand	Intergroup	0.271	7	0.039	44.239	**.001**
	In a Group	0.003	4	0.001		
	Entire	0.274	11			
Chlorine residue using chlorine diffuser w/ black sand	Intergroup	0.141	7	0.020	10.979	**.018**
	In a Group	0.007	4	0.002		
	Entire	0.149	11			
Chlorine residue using chlorine diffuser w/ white sand	Intergroup	0.016	3	0.005	2.072	.182
	In a Group	0.020	8	0.003		
	Entire	0.036	11			

Results from the one-way ANOVA indicate a statistically significant variation in residual chlorine levels among groups using chlorine with silica sand and black sand media, whereas no such variation was observed for the group utilizing white sand. The sum of squares between groups for the silica sand diffuser was 0.271, with a mean square value of 0.039. A calculated F-value of 44.239 corresponds to a p-value of 0.001, indicating a highly significant difference, as indicated by a p-value less than 0.05, in the chlorine residue between various time intervals or treatment conditions. The black sand diffuser resulted in a between-group sum of squares of 0.141 and a mean square of 0.020, yielding an F-statistic of 10.979 at a p-value of 0.018. Furthermore, a statistically significant difference is found in residual chlorine levels ($p < 0.05$).

The white sand diffuser exhibited a between-group sum of squares of 0.016, a mean square of 0.005, and an F-statistic of 2.072. The significance level associated with the test was 0.182, showing that the variations in chlorine residue across the different treatment groups did not have statistical significance (p value greater than 0.05). The research indicates that the type of sand media employed can greatly impact chlorine retention, with silica and black sand exhibiting considerable differences across various treatments, whereas white sand

sustains more consistent chlorine levels over time.

Discussion

The implementation of household-scale water filtration systems, coupled with educational outreach programs, has been shown to significantly enhance community awareness regarding the importance of safe and clean water. Moreover, it fosters the adoption of more hygienic and health-conscious practices. Technical training and hands-on supervision play a crucial role in facilitating knowledge acquisition and promoting behavioral transformation among residents in the utilization and management of water resources [26]. Chlorine for water treatment is available in various forms, including powder, liquid, and tablets. Typically, chlorine powder is composed of calcium hypochlorite, whereas liquid formulations are primarily made up of sodium hypochlorite. Typically, chlorine is used for disinfection either as chlorine gas (Cl_2) or in the form of calcium hypochlorite [$Ca(OCl)_2$] [27]. Inaccurate chlorine dosing can cause unpleasant sensory effects like a bitter taste and an unappealing odour. As a bactericide, chlorine is highly effective in eliminating pathogenic microorganisms from water. When using powdered forms in wastewater treatment, the chlorine dosage must adhere to set standards to prevent residual chlorine levels from surpassing 5.0 parts per million (ppm). Inadequate dosing of chlorine can lead to corrosion and scaling inside water distribution pipes, but elevated levels may also compromise water quality, making it unsuitable for drinking or household use [28].

Water distribution system residual chlorine concentrations are a reliable indicator of microbiological contamination [18]. Daily activities such as hygiene and sanitation require access to clean water. Significantly, waterborne diseases contribute to the high prevalence of severe and potentially fatal infectious conditions [29]. Inadequate water treatment processes before use can lead to contamination by Escherichia coli (E. coli) [30]. The presence of clean water facilities has been linked to diarrhoea rates in young children [31][32]. Additionally, the quality of water sources has been pinpointed as a contributing factor to stunting [6][33] [3]. Access to water, along with its quality and availability, constitutes a fundamental societal requirement. Clean water provision, in terms of both quality and quantity, must meet community demands and is governed by official regulations [34].

Population density is one of several factors contributing to bacterial contamination in clean water sources. Research conducted by Hafidzna Hanif and Anna in 2021 found that a statistical analysis showed a 4.8% influence of population density on Coliform bacterial content. Applying chlorine is crucial to reduce microbial contamination in drinking water [35]. The levels of residual chlorine in water distribution systems can signify microbiological contamination [18], requiring accurate dosing during the disinfection process. Spraying water with chlorine is a highly effective way to remove pathogenic microorganisms, especially E. coli and Coliform bacteria, from water before it is used by the community. Achieving the Sustainable Development Goals (SDGs) relies heavily on effective water treatment initiatives, especially in guaranteeing access to clean water and satisfactory sanitation facilities [4].

The application of chlorine to water contaminated with microorganisms results in substantial damage to bacterial cell walls, disruption of cellular permeability, and impairment of nucleic acids and enzymes [36]. Chlorine is extensively employed as the primary disinfectant in drinking water treatment due to its high efficacy at low concentrations, cost-effectiveness, and ability to produce residual concentrations when applied in appropriate doses. The use of chlorine in water disinfection is designed to eliminate pathogenic bacteria, while also serving as a potent oxidising agent critical for safeguarding human health (Scott, 2021).

Conventional chlorination in water treatment plants efficiently eliminates most inorganic reactants rapidly, but leaves behind slower organic reactants, which become the main secondary contaminants in the distribution network. Policies should give water quality parameters precedence over physical parameters to enable utility managers to maintain chlorine residue levels within safe limits for public health [38]. These findings enhance our comprehension of microbiology in drinking water and the health hazards associated with microorganisms, thereby facilitating more effective control of infectious diseases via enhanced disinfection methods in water treatment facilities [39].

This research compared the residual chlorine in the chlorine diffuser with the composition of chlorine added to various types of sand, including black sand, white sand, and silica sand. The remaining chlorine in each yield these results. Centralized treatment systems and water distribution networks are no longer feasible in certain areas, leading to an increased focus on point of use drinking water treatment systems [23]. In this study, it has been established that each type of sand used as a chlorine dissolution inhibitor exhibits a distinct difference in statistical analysis. The variation in chlorine residues resulting from the use of silica sand, black sand, and white sand in the chlorine diffuser can serve as a reference point for future research.

One of the ceramic materials, silica sand, features a natural white color and a silica purity of up to 99%, making it a potential ceramic material for fabrication technology [40]. Black sand is a type of

sand which is often found, typically treated with UV to eliminate methylene blue dye through a combination of photocatalytic adsorption and degradation [41]. Different media can be utilised for water treatment, particularly to enhance water quality biologically, including a novel method that incorporates silver, copper, and chlorine without the necessity for electricity which has the potential to be an economical household water treatment solution [42].

In the used piping network, chlorine levels decrease more rapidly at greater downstream distances and high temperatures as a result of increased microbial activity and chlorine mass transfer. To achieve a more optimal seasonal chlorine dosing strategy, system simulations must therefore consider these factors [43]. Monochloramine may be suggested as a safe and effective method for continuously disinfecting building piping systems, which can help prevent people who are susceptible from being exposed to legionellae and harmful disinfection by-products [44], as it is a compound where chlorine substitutes ammonia and is often used as a disinfectant. The presence of coliform bacteria can be used as an indicator for other types of bacteria. The presence of Coliform bacteria as a pollution indicator is determined by the number of its colonies, which correlates directly with the existence of pathogenic bacteria (E. coli). According to Saputri and Efendy (2020), the presence of Coliform can impact the life cycle of bacteria in water, and Coliform and E. coli can persist as pathogens capable of causing disease in humans and other living organisms [45], [46].

Conclusion

This study found the residual chlorine levels in the sample water and identified a significant difference between the groups of equipment used, particularly those using silica sand and black sand chlorine diffusers. No notable difference was found in the chlorine diffuser residue when using white sand. Variables such as pH, TDS, and temperature also showed no substantial discrepancies. This study requires ongoing research that incorporates additional factors, including the use of UV or other methods, which can be combined with chlorine, to improve microbiological contamination reduction.

Acknowledgments

This research is supported by the Central Government of Muhammadiyah via the RISETMU programme in 2024. The researcher wishes to express his appreciation to the UMS Research Institute for offering its guidance and assistance during the entire activity.

Reference

1. *Adams, E. A., Adams, Y. J., & Koki, C. (2021). Water, sanitation, and hygiene (WASH) insecurity will exacerbate the toll of COVID-19 on women and girls in low-income countries. Sustainability: Science, Practice, and Policy, 17(1), 86–90. https://doi.org/10.1080/15487733.2021.1875682*
2. *Adzura, Mitha, Fathmawati Fathmawati, Y. Y. (2021). Hubungan Sanitasi, Air Bersih dan Mencuci Tangan dengan Kejadian Stunting pada Balita di Indonesia. Frontiers in Neuroscience, 14(1), 1–13. https://doi.org/10.32382/sulolipu.v21i1.2098*
3. *Alftessi, S. A., Othman, M. H. D., Adam, M. R., Farag, T. M., Ismail, A. F., Rahman, M. A., Jaafar, J., Habib, M. A., Raji, Y. O., & Hubadillah, S. K. (2021). Novel silica sand hollow fibre ceramic membrane for oily wastewater treatment. Journal of Environmental Chemical Engineering, 9(1), 104975. https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104975*
4. *Ali, A. S., Gari, S. R., Goodson, M. L., Walsh, C. L., Dessie, B. K., & Ambelu, A. (2023). The impact of wastewater-irrigated urban agriculture on microbial quality of drinking water at household level in Addis Ababa, Ethiopia. Urban Water Journal, 20(9), 1207–1218. https://doi.org/10.1080/1573062X.2023.2253215*
5. *Asyfiradayati, R. (2017). Total Coliform Air Hujan Pada Tempat Penampungan Air Hujan (PAH) Skala Rumah Tangga Penduduk Kabupaten Lamongan. Prosiding - Semnas & Call for Papers, 37–40. https://publikasiilmiah.ums.ac.id/handle/11617/8971*
6. *Asyfiradayati, R., Budiyati, E., Porusia, M., Athaya, M. R., Muzakki, A. Z., Nindyasari, J. B., & Yatim, S. R. M. (2025). Evaluation of Adulticidal Chlorine with Black Sand, White Sand and Silica Sand for Decline Coliform Bacteria. Jurnal Kesehatan Lingkungan, 17(3), 268–276. https://doi.org/10.20473/jkl.v17i3.2025.268-276*
7. *Asyfiradayati, R. M. A. S., S., E., & P, O. (2022). UJi Bakteriologis Air Sumur di Beberapa Perumahan Kecamatan Kartasura.*
8. *Benwic, A., Kim, E., Khema, C., Phanna, C., Sophary, P., & Cantwell, R. E. (2018). Factors associated with post-treatment E. coli contamination in households practising water treatment: a study of rural Cambodia. International Journal of Environmental Health Research, 28(2), 178–191. https://doi.org/10.1080/09603123.2018.1453055*
9. *Clayton, G. E., Thorn, R. M. S., & Reynolds, D. M. (2021). The efficacy of chlorine-based disinfectants against planktonic and biofilm bacteria for decentralised point-of-use drinking water. Npj Clean Water, 4(1). https://doi.org/10.1038/s41545-021-00139-w*
10. *D., H. J., J., H. L. M., Ana, E.-Y., & A., S. J. (2024). Enhancing Microbial Disinfection in Household Water Treatment by Combining a Silver–Ceramic Tablet with Copper and Chlorine Technologies. Journal of Environmental Engineering, 150(7), 4024026. https://doi.org/10.1061/JOEEDU.EEENG-7555*
11. *De Luca, V., Carginale, V., Supuran, C. T., & Capasso, C. (2022). The gram-negative bacterium Escherichia coli as a model for testing the effect of carbonic anhydrase inhibition on bacterial growth. Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry, 37(1), 2092–2098. https://doi.org/10.1080/14756366.2022.2101644*

12. Dharmawan, I. W. S., Siregar, C. A., Narendra, B. H., Kadek, N., & Undaharta, E. (2023). Implementation of Soil and Water Conservation in Indonesia and Its Impacts on Biodiversity, Hydrology, Soil Erosion and Microclimate.
13. Djamel Ghernaout. (2018). Water Treatment Chlorination : An Updated Mechanistic Insight Review. Chemistry Research Journal, 4(2), 125–138.
14. Elvina Sophia Ranti, Maurisa Yuant Khairani, & Triastuti Rahayu. (2024). Improve The Microbiological Quality of Groundwater Around Bonoloyo Cemetery by Boiling. Quagga: Jurnal Pendidikan Dan Biologi, 16(2), 118–126. https://doi.org/10.25134/quagga.v16i2.327
15. Fibrianti, E. A., Thohari, I., & Marlik, M. (2021). Hubungan Sarana Sanitasi Dasar dengan Kejadian Stunting di Puseksmas Loceret, Nganjuk. Jurnal Kesehatan, 14(2), 127–132. https://doi.org/10.32763/juke.v14i2.339
16. Fisher, I., Kastl, G., & Sathasivan, A. (2023). Validity of chlorine-wall reaction models for drinking water distribution systems. Urban Water Journal, 20(9), 1157–1168. https://doi.org/10.1080/1573062X.2023.2241437
17. Griffiths, J. K. (2017). Waterborne diseases.
18. Hafidzna Hanif, A., & Anna, A. N. (2021). Analisis Spasial Kandungan Bakteri Coliform Pada Air Tanah Dangkal Di Kecamatan Colomadu Kabupaten Karanganyar. Universitas Muhammadiyah Surakarta. http://eprints.ums.ac.id/id/eprint/93402
19. Jesika, P., & Hilal, N. (2016). Hubungan Jenis Sumber Air Dan Personal Hygiene Dengan Kejadian Penyakit Dermatitis Di Desa Kedungrandu Kecamatan Patikraja Kabupaten Banyumas Tahun 2016. 35, 322–327. https://doi.org/10.31983/keslingmas.v36i4.3131
20. Jumadi, J., Yuli P, Danaryono, & Umrotun. (2025). Pemberdayaan Masyarakat dalam Pengelolaan Air Bersih Berkelanjutan melalui Program Air Minum Muhammadiyah (PAMMU) di Desa Kadipiro. 5(5). https://doi.org/10.59818/jpm.v5i5.1933
21. Permenkes 492/IV/2010, (2010).
22. kuswanto., Saudin yuniarto, I. H. (2021). Chlorine Diffuser Aplication to Reduce Coliform Numbers in the Wells. Jurnal Kesehatan Mayarakat, 13, 168–181.
23. Kwio-Tamale, J. C., & Onyutha, C. (2024). Influence of physical and water quality parameters on residual chlorine decay in water distribution network. Heliyon, 10(10), e30892. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30892
24. Macedo, D. O., & Janzen, J. G. (2022). Modelling the behaviour of chlorine within a drinking water distribution system following a microbial contamination event. Urban Water Journal, 19(5), 531–537. https://doi.org/10.1080/1573062X.2022.2030370
25. Made, N., Putri, A., Nadhifah, D. F., Marques, M. G. J. V, Stephanie, I., & Wikaningrum, T. (2024). Chlorine Residual in Wastewater Treatment : Implication for Pathogen Inactivation and Environmental Impact. 9, 341–347.
26. Marchesi, I., Paduano, S., Frezza, G., Sircana, L., Vecchi, E., Zuccarello, P., Oliveri Conti, G., Ferrante, M., Borella, P., & Bargellini, A. (2020). Safety and Effectiveness of Monochloramine Treatment for Disinfecting Hospital Water Networks. International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(17). https://doi.org/10.3390/ijerph17176116
27. McGrath, J., Maleki, M., Bouchard, C., Pelletier, G., & Rodriguez, M. J. (2021). Bulk and pipe wall chlorine degradation kinetics in three water distribution systems. Urban Water Journal, 18(7), 512–521. https://doi.org/10.1080/1573062X.2021.1893368
28. Meehan, K., Jurjevich, J. R., Chun, N. M. J. W., & Sherrill, J. (2020). Geographies of insecure water access and the housing–water nexus in US cities. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 117(46), 28700–28707. https://doi.org/10.1073/pnas.2007361117
29. Regulation of Ministry of Health Republic Indonesia No. 2 Tahun 2023 about Environmental Health, Kemenkes Republik Indonesia 1 (2023).
30. Monteiro, L., Carneiro, J., & Covas, D. I. C. (2020). Modelling chlorine wall decay in a full-scale water supply system. Urban Water Journal, 17(8), 754–762. https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1804595
31. Nagar, A., & Pradeep, T. (2020). Clean Water through Nanotechnology: Needs, Gaps, and Fulfillment. ACS Nano, 14(6), 6420–6435. https://doi.org/10.1021/acsnano.9b01730
32. Pangestu, M. P., & Lusno, M. F. D. (2025). Kualitas Air Minum Rumah Tangga di Indonesia Berdasarkan Parameter Fisik, Kimia, dan Mikrobiologi: Studi Cross-Sectional Mengacu pada Standar Nasional. Jurnal Penelitian Inovatif, 5(2), 1689–1696. https://doi.org/10.54082/jupin.1534
33. Porusia, M., Asyfiradayati, R., Ratna, S., Putri, S., & Dwinanda, S. (2022). Comparison of Microbiological Quality of Well Water and Contaminated River Water in Open Defecation Area. 49(Ichwb 2021), 95–100. https://doi.org/10.2991/ahsr.k.220403.013
34. Raihani, N., Rahayuwati, L., Yani, D. I., & Rakhmawati, W. (2023). Hubungan Ketersediaan Sarana Sanitasi Dasar Dengan Kejadian Stunting Pada Balita the Relationship Between Availability Basic Sanitation with Toddlers Stunting Incidence At Sukamulya Village. 6(1), 35–43. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.24198/jnc.v6i1.44429
35. Rongre, A. J. P., Joseph, W. B. S., & Pinontoan, O. R. (2018). Kandungan Escherichia Coli Dan Kondisi Fisik Sumur Gali Di Kelurahan Kakaskasen Iii Lingkungan Iii Kecamatan Tomohon Utara Kota Tomohon. Jurnal KESMAS, 7(4), 1–6. https://ejournal.unsrat.ac.id/index.php/kesmas/article/download/23181/22874
36. Saputri, E. T., & Efendy, M. (2020). Kepadatan Bakteri Coliform Sebagai Indikator Pencemaran Biologis Di Perairan Pesisir Sepuluh Kabupaten Bangkalan. Juvenil:Jurnal Ilmiah Kelautan Dan Perikanan, 1(2), 243–249. https://doi.org/10.21107/juvenil.v1i2.7579

37. Saputri, N., & Astuti, Y. P. (2019). Hubungan Faktor Lingkungan Dengan Kejadian Diare Pada Balita Di Puskesmas Bernung. Jurnal Ilmu Keperawatan Dan Kebidanan, 10(1), 101–110. https://ejr.umku.ac.id/index.php/jikk/article/view/619/378
38. Solomon, E. T., Robele, S., Kloos, H., & Mengistie, B. (2020). Effect of household water treatment with chlorine on diarrhea among children under the age of five years in rural areas of Dire Dawa, eastern Ethiopia: A cluster randomized controlled trial. Infectious Diseases of Poverty, 9(1), 1–13. https://doi.org/10.1186/s40249-020-00680-9
39. Sutapa, I. D. A., Fakhrudin, M., & Yogaswara, H. (2021). Implementation of ecohydrology to support sustainable water resources management in tropical region, Indonesia. Ecohydrology & Hydrobiology, 21(3), 501–515. https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2021.08.010
40. Suyanto, B., Indraswati, D., Hendrarinata, F., Jayadi, H., Santoso, H., & Nugroho, W. (2022). Potential of Solar Cells as Energy Disinfection Machines for Water Sources. 12, 135–143. https://doi.org/10.31838/ecb/2023.12.s3.019
41. Vaidya, R., Kumar, K. R. S., Mohan Kumar, M. S., & Rao, L. (2023). Chlorine degradation in continuous and intermittent drinking water supply networks. Urban Water Journal, 20(1), 60–73. https://doi.org/10.1080/1573062X.2022.2139275
42. Wagdy, R., Mubarak, M. F., Mohamed, R. S., & El Shahawy, A. (2024). Industrial-scale feasibility for textile wastewater treatment via Photocatalysis-adsorption technology using black sand and UV lamp. RSC Advances, 14(15), 10776–10789. https://doi.org/10.1039/d4ra00421c
43. Wei, Y., Wu, H., Zhang, X., Liang, Y., Shi, D., Wang, L., Li, H., Yu, H., Yang, D., Zhou, S., Chen, T., Yang, Z., Li, J., & Jin, M. (2024). Comparative analysis of chlorine-resistant bacteria after chlorination and chloramination in drinking water treatment plants. Journal of Hazardous Materials, 469, 134075. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134075
44. WHO. (2018). E. coli.
45. WHO. (2022). Guidelines for drinking-water quality: incorporating the first and second addenda. In WHO (Vol. 11, Issue 1). https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064
46. Yantu, S. S., Warouw, F., & Umboh, J. M. L. (2021). Hubungan Antara Sarana Air Bersih dan Jamban Keluarga dengan Kejadian Diare Pada Balita di Desa Waleure. Jurnal KESMAS, 10(6), 24–30. https://ejournal.unsrat.ac.id/v3/index.php/kesmas/article/view/35445

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Залишкова поведінка хлору при дезінфекції води з використанням комбінованих піщаних середовищ із застосуванням хлору

Резанія Асифірадаяті [1]
викладач кафедри громадського здоров'я,
[1] Університет Мухаммадії Сураката, Сураката, Індонезія;
Вінді Вуландарі [1]
викладач кафедри громадського здоров'я;
Дженіта Берліан Н [1]
студент кафедри громадського здоров'я;
Сіті Рохана Мохд Ятім [2]
викладач, факультет охорони здоров'я,
[2] Університет технологій MARA, Селангор, Малайзія

Вода є потребою кожної людини в усіх частинах світу. В Індонезії свердловини, що забезпечують доступ як до мілководних, так і до глибоких джерел ґрунтових вод, служать основним джерелом чистої води. Мікробіологічне забруднення води негативно впливає, особливо на здоров'я. Система водопостачання є фундаментальним компонентом сталого міського розвитку. Тим не менш, вона часто стикається з низкою складних проблем, особливо в країнах, що розвиваються. Метою цього дослідження є вивчення концентрації залишкового хлору протягом різного часу контакту з використанням різних комбінацій середовищ, а саме чорного піску, кварцового піску та білого піску, для оцінки їхньої ефективності у підтримці рівня хлору під час очищення води. У цьому дослідженні використовувався квазіекспериментальний дизайн для оцінки рівня залишкового хлору в очищеній воді з використанням різних типів піску, інтегрованого з хлором у дифузійні труби. Загалом було використано 720 літрів води, розділених на 36 резервуарів, що містили 2,5 мг хлору, кожен з яких містив 20 літрів та 500 грамів одного з трьох типів піску: чорний пісок, білий пісок або кварцовий пісок. Зразки води в 20-літрових контейнерах обробляли хлорним розпилювачем протягом періодів експозиції 30, 45 та 60 хвилин. У дослідженні оціню-

вали кілька параметрів, включаючи температуру, pH, загальний вміст розчинених твердих речовин (TDS) та залишковий хлор. Дані аналізували та представляли за допомогою однофакторних та двофакторних таблиць, а статистичне тестування проводили за допомогою однофакторного дисперсійного аналізу (ANOVA). Результати показали, що дифузор хлору, що містить білий пісок, перевищував допустимий поріг залишкового хлору при часі контакту 45 та 60 хвилин. Статистичний аналіз за допомогою однофакторного дисперсійного аналізу виявив значну різницю в концентраціях залишкового хлору між середовищем з кварцовим піском та чорним піском ($p < 0,05$). Однак, статистично значущої різниці в концентраціях хлору з часом для дифузора з білим піском не спостерігалося. Ці результати свідчать про те, що білий пісок може призвести до тривалого затримування хлору, що потенційно може призвести до концентрацій вище рекомендованих меж. Вперше проведено аналіз, який показує, що різні типи піску в дифузорі хлору мають відмінності в залишковому хлорі у воді, що дозволяє використовувати його як орієнтир для подальших досліджень у сфері очищення води.

***Ключові слова**: залишок хлору, кварцовий пісок, білий пісок, чорний пісок, безпечна питна вода, дезінфекція, хлор, комбінація середовищ.*

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу
Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 3 червня 2025 р.
Прийнята 17 листопада 2025 р.

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-38
UDC 504.064:556.5:519.876.5(477.4)
Received 15 July 2025
Accepted 29 October 2025

Entropy-weighted model for assessing the environmental safety of surface waters in the Southern Bug river basin

Vitalii Bezsonnyi
DSc (Technical), Associate Professor, Department of Hotel, Restaurant Business and Craft Technologies,
Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: vitalii.bezsonnyi@hneu.net, https://orcid.org/0000-0001-8089-7724

ABSTRACT

Introduction. Ensuring the environmental safety of river basins is a critical challenge for Ukraine, particularly for strategically important waterways like the Southern Bug, which is subject to significant technogenic and agricultural pressure. Traditional assessment methods often rely on fixed weighting coefficients that fail to capture the local specifics of pollution. The aim of this study is to quantitatively assess the environmental safety of surface waters in the Southern Bug River basin using an entropy-weighted water quality index (EWQI), which accounts for the spatiotemporal variability and informational significance of hydrochemical indicators.

Methods. The study is based on a database of hydrochemical observations for the period 2020–2024, collected from 36 monitoring stations across the upper, middle, and lower reaches of the river. The analysis included 12 key water quality parameters. The methodology involved data normalization and the calculation of entropy weights using Shannon's information theory to determine the contribution of each parameter to the overall pollution level. Analytical tools included the calculation of seasonal EWQI values, spatial visualization using OpenStreetMap (OSM), Principal Component Analysis (PCA) for factor identification, and k-means clustering for zoning the basin.

Results. Spatial analysis revealed a distinct downstream gradient of water quality deterioration: from clean waters (Classes II–III, EWQI ≤ 1.0) in the upper basin to polluted and highly polluted waters (Classes V–VII, EWQI > 3.0) in the estuarine zone near Mykolaiv. A significant seasonal trend was established, with the mean EWQI increasing from 1.85 in the cold period to 2.46 in the warm period, indicating a 33% degradation in water quality due to intensified eutrophication processes. Entropy weight analysis identified ammonium (22%), phosphates (18%), and BOD_5 (15%) as the dominant contributors to the index, confirming the prevalence of biogenic and organic pollution. PCA results indicated that three factors – organic load, nutrient enrichment, and mineralization – explain more than 80% of the variance in the data.

Conclusions. The study confirmed that the entropy-weighted model provides an objective and sensitive tool for assessing aquatic ecosystems, effectively revealing spatial heterogeneity and seasonal risks. The research highlights that the warm season represents a period of critical ecological stress for the Southern Bug. The practical value of the model lies in its applicability for automated assessment and spatial mapping within the state environmental monitoring system, providing a scientific basis for optimizing monitoring networks and management decisions.

Keywords*: entropy-weighted index, environmental safety. water quality, Southern Bug River basin, hydrochemical parameters, seasonal dynamics, GIS, clustering, PCA, surface water monitoring.*

In cites: Bezsonnyi Vitalii (2025). Entropy-weighted model for assessing the environmental safety of surface waters in the Southern Bug river basin. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 516-529. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-38

Introduction

The problem of preservation and rational use of Ukraine's water resources remains one of the most pressing issues in the context of ensuring environmental safety, sustainable development, and adaptation to climate change. The condition of surface waters serves as an integral indicator of technogenic pressure on the environment, since water bodies accumulate pollution from industrial, agricultural, municipal, and transport sectors. Contemporary Ukrainian researchers emphasize that river basins act as the main receptors of anthropogenic discharges and secondary pollutants; therefore, their hydroecological state directly determines the level of regional environmental safety. The study [1] demonstrated that even under regulatory control of wastewater quality, environmental risks from domestic and industrial effluents remain significant, particularly due to the instability of treatment facilities and the overload of sewer systems in urban areas. Similar patterns are observed for the large basin systems of Ukraine, such as the Dnipro, Siverskyi Donets, and Southern Bug rivers. Within these catchments, there is an accumulation of biogenic compounds, organic substances, and heavy metals, which form persistent pollution zones and disrupt the biogeochemical balance [2, 3].

Research conducted during 2021–2023 revealed that the influence of technogenic sources on surface water quality has a systemic nature. In study [2], the concept of using composite indicators of water ecological safety was substantiated, integrating the cumulative effects of several groups of parameters: toxicological, biogenic, and organic. The developed approaches made it possible to quantify the degree of degradation of aquatic systems and to compare the ecological state of different basins. The authors emphasize that traditional index-based assessment methods (e.g., WQI) do not always reflect the real complexity of processes in aquatic envi-

© Bezsonnyi Vitalii, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

ronments, as they use fixed weighting coefficients insensitive to spatiotemporal variability.

Particular attention is paid to the Southern Bug River basin, one of the largest hydrological systems of Right-Bank Ukraine, which has crucial strategic, socio-economic, and ecological significance. The catchment area encompasses industrially developed regions with a high concentration of enterprises in machine-building, food, chemical, and energy industries, as well as vast agricultural lands. This land-use structure determines the combined nature of technogenic pressure-both point (from wastewater discharges) and diffuse (from agricultural runoff). The study [3] showed that such combined sources are responsible for the formation of complex multielement pollution systems, manifested in exceedances of the maximum allowable concentrations of ammonium nitrogen, phosphates, and organic substances, as well as in increased chemical oxygen demand (COD) and biochemical oxygen demand (BOD_5) values.

According to the integral assessment of the state of Ukraine's water bodies performed by the authors [4], the Southern Bug basin belongs to the category of environmentally stressed systems, especially during the summer–autumn period. During this time, a decrease in water flow, intensification of thermal stratification, and accumulation of pollutants in bottom layers are observed. Under low-water conditions and reduced water exchange, the highest values of the entropy-weighted integral pollution index are recorded, indicating ecosystem degradation and a reduction of its self-regulatory capacity.

The problem is aggravated by the fact that the existing system of environmental monitoring does not always ensure sufficient representativeness of the data. The frequency of sampling and the number of observation points are limited, while the interpretation of results often relies on expert judgments. Therefore, there is a need to develop formalized models capable of providing objective, quantitative, and automated assessment of the state of surface waters based on available hydrochemical parameters.

In this context, the application of the entropy-weighted approach appears particularly promising. It is based on Shannon's information theory and enables the determination of both the degree of system uncertainty and the informational significance of each water-quality parameter [2–4]. This method eliminates the subjectivity inherent in expert weighting, since the coefficients are calculated directly from empirical data, reflecting the internal structure of variations in hydrochemical parameters. The use of entropy-weighted indices allows not only the description of the current state of aquatic ecosystems but also the identification of degradation trends, zones of increased risk, and temporal phases of water-quality deterioration.

The scientific problem addressed in this study lies in the absence of regionally adapted models for assessing environmental safety in most Ukrainian river systems, including the Southern Bug. Existing approaches usually focus on nationwide generalizations, whereas this research proposes a localized assessment framework that accounts for the seasonal dynamics, spatial structure of the basin, and specific features of anthropogenic pressure. Unlike previous works, which emphasized aggregated assessments at the national scale, this study seeks to provide a detailed representation of processes within a single basin, considering its hydrological and anthropogenic particularities.

The development and testing of an entropy-weighted model for assessing the environmental safety of the Southern Bug River basin will make it possible to solve several applied tasks, namely:

- to ensure quantitative comparison of different river sections using a unified scale;
- to identify temporal phases of ecological stress;
- to enhance the substantiation of management decisions in the field of water-resource protection;
- to optimize the monitoring network by focusing resources on the most problematic areas.

The implementation of this approach is fully consistent with the objectives of the EU Water Framework Directive 2000/60/EC, aimed at achieving a "good ecological status" of water bodies, and it aligns with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs): SDG 6 "Clean Water and Sanitation", which calls for universal access to safe water and effective management of water resources; and SDG 12 "Responsible Consumption and Production", which focuses on reducing the environmental impacts of economic activities.

Thus, the study of the environmental safety of the Southern Bug River basin using the entropy-weighted approach has a dual significance: (1) scientific-methodological, as it expands the toolkit for quantitative evaluation of aquatic-system conditions; and (2) applied, as it provides the basis for improving water-resource management systems at the regional level and integrating the obtained results into national monitoring programs.

The assessment of the ecological state of water bodies is a complex task that requires comprehensive consideration of numerous factors: anthropogenic load, natural self-purification processes, seasonal variations in hydrological regimes, and the influence of climatic conditions. Over the past decade, the scientific community has focused on developing integrated indicators that enable the quantitative evaluation of the environmental safety of aquatic systems based on heterogeneous monitoring data [5].

In contemporary Ukrainian research, approaches based on assessing the ecological stability of catchment landscapes and bioindication are actively being developed alongside traditional hydrochemical methods. Specifically, the works of Malovanyy M. S. et al. have demonstrated a close correlational relationship between the coefficient of landscape ecological stability and the hydroecological status of river basins. Using the upper reaches of the Pripyat River basin as an example, the authors established that areas with a high proportion of stable landscape elements (forests, meadows) are characterized by higher Macrophyte Index (MIR) values and better water quality. Statistical analysis confirmed a strong inverse relationship (r = -0.87) between anthropogenic landscape pressure and integrated water quality indicators [6].

Studies of the biotic component conducted on the Siret and Turia rivers have shown the effectiveness of using the Macrophyte Index (MIR) and zooperiphyton indices (TBI, BMWP, saprobic index) for diagnosing the ecological status of transboundary rivers. It was found that different biotic indices might yield varied assessments for the same monitoring site (ranging from "polluted" to "very polluted" water), highlighting the necessity of employing integrated approaches [7, 8].

Concurrently, for the operative forecasting of technogenic loads, Ponomarenko R. V. et al. proposed the use of material balance mathematical models, which describe a linear dependence between the increase in pollutant mass and its concentration. It has been established that in actual water bodies, unlike in "pure dilution" conditions, self-purification processes or secondary pollution play a significant role, altering the nature of these dependencies for conservative and non-conservative substances. However, such deterministic models require extensive data sets, which are not always available under limited monitoring conditions [9].

Traditionally, to summarize large sets of hydrochemical parameters, researchers have applied index-based methods, the most well-known of which include the Water Quality Index (WQI), the Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI), and the National Sanitation Foundation WQI (NSFWQI). These approaches are widely used in both scientific and practical applications, as they allow the aggregation of monitoring results into a single integral indicator [10].

However, many scholars point out the limitations of classical indices. The weighting coefficients used in WQI formulations are typically defined through expert judgment, which reduces objectivity and makes the assessment dependent on subjective decisions. Moreover, such models are insufficiently sensitive to local dynamics–they do not adequately account for seasonality, variability, or interdependence among parameters [11].

The attempt to eliminate subjectivity in index construction has led to the development of methods based on the information-entropy approach. According to Shannon's theory, entropy represents a measure of uncertainty or disorder within a system. In the context of environmental monitoring, entropy characterizes the degree of informational variability of each parameter–that is, the extent to which a given indicator fluctuates in space and time. The higher the entropy, the lower its informational contribution to an overall evaluation, and vice versa.

In the study by Adimalla (2021), an entropy-weighted water-quality index was first applied to rivers in India, which enabled the elimination of subjective weights and increased the reliability of integral assessments [12]. Similar approaches have been implemented in Iran, China, India, and South Africa for the analysis of both surface and groundwater quality. In all cases, it was shown that entropy-weighted models reveal spatial variability and seasonal fluctuations of parameters more effectively than classical WQI models.

Specifically, Wang et al. (2021) demonstrated that when entropy-based weighting was applied, the coefficient of determination between computed indices and actual water-quality data increased from 0.72 to 0.89, confirming improved accuracy and stability of the method [13]. Thus, information-entropy approaches are now recognized as among the most effective tools for the assessment of complex natural-technogenic systems.

In Ukrainian scientific practice, the information-entropy approach has been actively developed over the past five years. Bezsonnyi, Plyatsuk, and co-authors proposed composite indicators of water ecological safety, in which parameter integration is carried out considering entropy-based weights calculated according to the variability of hydrochemical indicators [2]. These studies emphasize that entropy is a natural criterion for determining the significance of each parameter in the overall pollution structure, as it reflects the degree of its informational "saturation" and sensitivity to changes in the aquatic environment.

The development of information-entropy methods in water resources monitoring allows for overcoming the uncertainty inherent in traditional deterministic models. In the review paper by Bezsonnyi V. L. (2023), the global experience of using Shannon's theory for designing monitoring networks is summarized, where entropy acts as a measure of the informational content of the data. It is demonstrated that the entropic approach facilitates the optimization of observation post locations and sampling frequency, based not on prescriptive regula-

tions, but on the actual variability of hydrological and hydrochemical parameters [14].

A practical application of this approach was carried out for a drinking water supply source in the Dnipro agglomeration. The calculation of the Entropy-Weighted Quality Index (EWQI) revealed significant seasonal differentiation in water quality: index values deteriorated during the warm period due to eutrophication and secondary pollution processes, a phenomenon not always captured by traditional assessment methods [15]. This supports the thesis that the weights of parameters in integral indices should not be static but should reflect the degree of disorder (uncertainty) within the system during a specific season. It is precisely the consideration of the seasonal dynamics of entropic weights, substantiated in previous research, that forms the basis of the developed model for the Southern Buh River basin.

In paper [3], the authors presented the results of an integrated assessment of the sources of pollution of the Dnipro Reservoir, based on the combination of traditional indices and entropy-based weights. It was demonstrated that such models allow for a more objective identification of basins with the highest level of ecological risk. In subsequent works [4], the entropy-weighted approach was extended to all major river basins of Ukraine (Dnipro, Dniester, Danube, Southern Bug, Don, Vistula, and the rivers of the Black Sea and Azov Sea regions). The obtained results showed that the Southern Bug, as well as the Black Sea and Azov Sea basins, exhibited the highest values of the entropy-weighted integral pollution index (EWQI), while the Danube and Dnipro basins demonstrated relatively stable conditions.

Thus, within the framework of domestic studies, a methodological foundation for the quantitative entropy analysis of aquatic ecosystems has been formed, which enables the objective evaluation of water quality without the use of expert weighting coefficients and ensures better comparability of results across different regions.

Beyond monitoring studies, a crucial component in ensuring the ecological safety of river basins is the development of effective technologies to reduce pollutant input from both point and non-point (diffuse) sources. Specifically, the work of Havryshko M., Popovych O., and Malovanyy M. S. analyzed the impact of highly concentrated wastewater from the food industry on water bodies. The authors proposed combined biotechnological treatment schemes that allow for a significant reduction in the load of organic substances (BOD, COD) and nitrogen compounds, which, as shown in our research, are critical for the Southern Buh basin [16].

The problem of diffuse pollution, particularly runoff from urbanized territories and roadways, is addressed in the research by Ugnenko Ye. B. and Yurchenko V. O. The authors demonstrated the effectiveness of using natural zeolites for the sorption purification of surface runoff from oil products, a relevant approach for technologically burdened sections of river basins [17].

A deeper understanding of nitrogen transformation processes – a key element of eutrophication – is highlighted in the works of Yurchenko V. O. and Tsitlishvili K. O. These researchers substantiated the use of immobilized microbiocenoses in rotating biological contactor (RBC) systems for implementing nitrification, denitrification, and the anammox process. This allows for deep nitrogen removal even under conditions of high organic pollution concentrations, representing an important technological solution for improving the status of river ecosystems [18].

For managing water treatment and wastewater disposal processes, Shtepa V. M., Pliatsuk L. D., et al. proposed an ecological-energy criterion that enables the optimization of treatment plant operations by balancing the ecological safety of discharges with energy consumption. This approach correlates with the principles of sustainable development and the requirements of ISO 14001 standards [19].

Contemporary research increasingly underscores the critical necessity of accounting for military impacts when assessing the ecological safety of Ukrainian river basins. The destruction of hydraulic structures, such as the Kakhovka HPP, and the cessation of operations at the Dnipro HPP have led to significant alterations in the hydrological and hydrochemical regimes of the Dnipro River. As noted by Horoshkova L. et al. (2025), the elimination of the Kakhovka Reservoir initiated complex self-purification processes in the upper pools but simultaneously created risks of secondary pollution due to changes in flow velocity and oxygen regime [20].

Furthermore, military operations cause direct chemical contamination of water bodies. Bezzsonnyy V. and Nekos A. (2023) established that in active conflict zones (e.g., the Siverskyi Donets River basin), emergency discharges and infrastructure destruction lead to a sharp increase in organoleptic indicators and nitrogen-containing substances, posing carcinogenic and mutagenic risks to the population [21].

To monitor this specific type of pollution, including heavy metal contamination resulting from shelling and man-made accidents, innovative geophysical methods are proposed. Menshov O., Horoshkova L., et al. (2025) demonstrated the effectiveness of analyzing the magnetic susceptibility of bottom sediments and soils [22]. Their research in the Khortytsia National Reserve revealed abnormally high magnetic susceptibility values that correlate with the content of heavy metals (Zn, Cr, Cu, Ni), although in some cases, the lithogenic factor of the

Ukrainian Shield is dominant. This approach allows for the retrospective reconstruction of pollution history and the separation of natural and anthropogenic anomalies [23].

Beyond military factors, a potent anthropogenic driver of water quality degradation remains the fragmentation of river channels by artificial water bodies. Research by Hapich H. et al. (2022) on small rivers in the Dnipropetrovsk region (Zhovtenka, Nyzhnia Tersa, etc.) proved a close correlation (R2 = 0.62) between the coefficient of flow regulation and the level of mineralization [24]. The transformation of rivers into cascades of evaporating ponds leads to the transgression of mineralization standards by 7–12 times, necessitating a review of the feasibility of operating such hydraulic structures. Andrieiev V. et al. (2022) proposed simplified specific indicators for assessing management effectiveness, which confirmed that in the Steppe zone of Ukraine, ponds retain only 25% of the water volume while occupying 44% of the area, primarily acting as evaporators and concentrators of pollution [25].

The agricultural sector also exerts significant pressure on the ecological status of basins, particularly during wartime. Horoshkova L. et al. (2024) analyzed the war's impact on the agrarian potential of the Kherson region, noting that the destruction of irrigation systems and soil contamination necessitates the use of econometric models (such as the Cobb-Douglas function) to optimize fertilizer and pesticide loads, which directly influences diffuse runoff into river basins [26].

In recent international studies, there has been an increasing trend toward integrating entropy-based methods with GIS technologies, machine learning, and decision-making models. For instance, Zhang et al. (2020) proposed a combination of the entropy-weighted water-quality index and principal component analysis (PCA) for the Yangtze River Basin, allowing identification of the leading pollution factors and the creation of a spatially explicit model of index distribution [27]. Similarly, Bekele Emiru et al. (2025) developed an entropy-weighted index for surface waters in South Africa using Sentinel-2 satellite data, which made it possible to implement real-time spatial monitoring [28].

A comparative review of studies [29–32] indicates that in most cases, the entropy-weighted approach has proven highly effective in revealing the seasonal and spatial regularities of water-quality variation. This confirms the universality of the method for different types of aquatic ecosystems.

Despite significant progress in the theory and practice of entropy-weighted assessment, several unresolved issues remain. First, most studies are oriented toward national or global scales and do not adequately account for the specific features of individual river basins. Only a few works consider local hydrological conditions, notably those for the Dnipro Reservoir [3]. Second, domestic studies are mainly based on annual averages, which limits the ability to analyze seasonal dynamics. Third, there is a lack of integration with geographic information systems, which constrains the application of such models in practical water-resource management.

Therefore, the relevance of further research lies in developing a regionally adapted entropy-weighted model for assessing the environmental safety of the Southern Bug River basin, which would account for seasonal variability, spatial heterogeneity of hydrochemical parameters, and local sources of technogenic pressure. This scientific niche determines the purpose and novelty of the present study.

The aim of this research is to quantitatively assess the environmental safety of surface waters in the Southern Bug River basin using an entropy-weighted model (EWQI) that takes into account the spatio-temporal variability of hydrochemical indicators and their informational significance. This approach makes it possible not only to provide an integral characterization of water quality but also to identify the key factors determining the ecological state of the basin and its spatial heterogeneity.

To achieve this objective, the study addressed the following main tasks:

- to compile a database of hydrochemical observations of surface waters for the period 2020–2024 within the Southern Bug River basin, including a complete set of key water-quality indicators;
- to perform normalization of hydrochemical parameters and to calculate their entropy weights, reflecting the informational contribution of each parameter to the overall structure of system variability;
- to calculate the entropy-weighted water quality index (EWQI) for each monitoring station separately for the warm period (April–September) and the cold period (October–March);
- to construct interactive GIS-based maps of EWQI distribution using OpenStreetMap (OSM), determine water-quality classes (I–VII), and visualize seasonal and spatial differences across the basin;
- to conduct a comparative and correlation–statistical analysis of the obtained results, including the assessment of seasonal variability of EWQI, determination of individual parameters' contributions to the overall index formation, and verification of the statistical significance of differences between the warm and cold seasons;
- to perform additional analyses aimed at a deeper understanding of the spatial and factor-driven patterns of pollution, specifically: to construct a map of seasonal changes ΔEWQI (warm–cold period); to perform spatial clustering of monitoring sites by the

level of pollution; to evaluate seasonal entropy weights of indicators and compare them; to perform principal component analysis (PCA) in order to determine the dominant pollution factors;

- to synthesize the research results into an integrated assessment of the ecological state of the basin, identify critical sections with the lowest environmental safety levels, and justify priority directions for further monitoring and water-quality management.

Methods

The initial data for this research were derived from the official results of the State Monitoring of Surface Waters published by the State Water Resources Agency of Ukraine for the years 2020–2024. Within the Southern Bug River basin, data from 36 stationary observation posts were selected, covering the upper, middle, and lower reaches of the river. This spatial representativeness ensures the possibility of a comprehensive assessment of the surface-water condition throughout the basin.

The study considered twelve key hydrochemical indicators representing various types of aquatic pollution, namely: biochemical oxygen demand (BOD_5), chemical oxygen demand (COD), permanganate oxidizability, dissolved oxygen concentration, ammonium, nitrates, nitrites, phosphates, synthetic surfactants (SPAR), suspended solids, sulfates, and chlorides. These parameters are the principal indicators of anthropogenic load, organic pollution, biogenic processes, and overall mineralization of water.

To unify indicators expressed in different measurement units, the initial data were normalized in accordance with standard approaches used in entropy analysis. For most parameters, normalized values were calculated using the following formula:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (1)$$

where (x_{ij})represents the concentration value of the *i*-th indicator at the *j*-th monitoring site.

For the parameter “dissolved oxygen”, an inverse normalization was applied:

$$y_{ij} = \frac{x_{\max} - x_{ij}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (2)$$

since a decrease in its concentration indicates a deterioration in the ecological condition of the water body.

After normalization, the data were divided into two seasonal subsets: the warm period (April–September) and the cold period (October–March). For each subset, the information entropy (E_j) of every parameter was calculated using Shannon’s formula:

$$E_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^{n} p_{ij} \ln p_{ij}, \quad (3)$$

where (p_{ij}) is the relative share of the normalized parameter value in the sample.

Based on the calculated entropy values, weight coefficients (W_j) for each indicator were determined as follows:

$$W_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^{m} (1 - E_j)}. \quad (4)$$

The obtained weights demonstrated distinct seasonal differentiation: during the warm period, the influence of organic and biogenic pollution (ammonium, phosphates, BOD_5) prevailed, whereas in the cold period, mineralization processes (sulfates, chlorides, COD) played a more significant role.

The entropy-weighted water-quality index (EWQI) was calculated as an aggregated value combining the relative concentrations of parameters with their respective entropy weights. The computation followed the formula:

$$EWQI = \sum_{j=1}^{m} W_j \frac{I_j}{S_j}, \quad (5)$$

where (I_j) is the measured value of the *j*-th parameter, and (S_j) is its regulatory limit according to the Ukrainian standard DSTU 4808:2007.

The resulting indices characterize the integral level of pollution for each monitoring site and for each season. To facilitate comparison, mean seasonal values of EWQI were determined within every observation point.

For spatial interpretation, interactive maps of EWQI distribution were created using OpenStreetMap (OSM) and the Folium library in Python. Each monitoring site was marked with a color-coded symbol corresponding to a seven-class water-quality scale: I (EWQI ≤ 0.3) – blue; II (0.3–1.0) – green; III (1.0–1.5) – orange; IV (1.5–2.0) – pink; V (2.0–4.0) – red; VI (4.0–8.0) – dark red; VII (>8.0) – black.

In addition to the maps for the warm and cold periods, a ΔEWQI map (warm – cold) was generated to display the seasonal dynamics of pollution levels and to identify areas with the most contrasting changes in water quality.

To verify the statistical significance of seasonal differences, the nonparametric Mann–Whitney test was applied, confirming the reliability of differences between the warm and cold periods at the $p < 0.01$ level.

To identify spatial regularities in water quality, cluster analysis using the k-means method was conducted, which allowed the delineation of four main zones with similar EWQI profiles.

To reveal the structure of interrelationships among parameters, the principal component analysis (PCA) method was applied. The results showed that the main factors determining water-quality variability were: organic pollution (BOD_5, COD, dissolved

oxygen); biogenic load (ammonium, phosphates, nitrates); mineralization processes (sulfates, chlorides).

The estimation of the relative contribution of individual parameters to EWQI formation indicated that the dominant influence belonged to ammonium (up to 22%), phosphates (18%), and BOD_5 (15%), consistent with the PCA results.

The reliability maps constructed from the model outputs made it possible to identify areas with unstable water-quality characteristics that require enhanced monitoring and adjusted sampling frequency in future studies.

Results

For each monitoring site within the Southern Bug River basin, the mean seasonal values of the entropy-weighted water quality index (EWQI) were calculated separately for the warm period (April–September) and the cold period (October–March). The obtained results showed that index values ranged from 0.4 (indicating clean water, Class II) to 6.8 (very polluted water, Classes VI–VII).

On average, for the entire basin, the mean EWQI value was 1.85 ± 0.12 during the cold period and 2.46 ± 0.18 during the warm period, indicating a 33% deterioration in water quality in summer compared to winter. This dynamic is attributed to the intensification of biogenic processes, reduced aeration, and higher water temperatures, which stimulate eutrophication processes.

Comparison of these values demonstrates a

Table 1

Presents a fragment of the calculated mean seasonal EWQI values for selected monitoring sites within the basin

Monitoring station name	Coordinates (lat., lon.)	EWQI (cold)	Class	EWQI (warm)	Class	ΔEWQI	Interpretation
Ladyzhyn (upstream)	48.69, 29.24	1.12	III	1.78	IV	+0.66	Deterioration of water quality due to municipal wastewater impact
Pervomaisk (downstream)	48.04, 30.84	1.65	IV	2.45	V	+0.80	Zone of biogenic pollution
Voznesensk	47.56, 31.32	2.08	V	3.12	V–VI	+1.04	Eutrophication and low dissolved oxygen
Mykolaiv (estuary section)	46.97, 31.97	2.86	V	6.80	VII	+3.94	Extremely polluted area
Haivoron (upper reach)	48.33, 29.85	0.43	II	0.62	II–III	+0.19	Relatively clean water
Yuzhnoukrainsk (reservoir)	47.83, 31.18	0.78	II–III	1.25	III–IV	+0.47	Moderate increase in organic load

Note: ΔEWQI = EWQI (warm) – EWQI (cold)

clear downstream gradient of increasing EWQI–from 0.4–0.6 in the upper reaches to >6.0 near the estuary–reflecting the cumulative impact of anthropogenic load along the river course. Conversely, in areas with predominantly natural flow regimes (upper reaches, tributaries near Haivoron–Ladyzhyn), consistently low index values were observed, corresponding to Classes II–III (clean or moderately polluted waters).

Figure 1 illustrates the seasonal distribution of mean EWQI values across the Southern Bug River basin. As can be seen, during the warm period most monitoring points shift upward by one quality class (from "moderately polluted" to "polluted"), confirming the overall trend of seasonal deterioration in water quality.

The analysis of the obtained results confirmed that the seasonal variability of the EWQI index is statistically significant ($p < 0.01$, Mann–Whitney U test). This indicates that water-quality formation processes in the basin have a distinct seasonal component.

During the warm period (mean EWQI = 2.46), the main determinants are the increased inflow of biogenic compounds (ammonium, phosphates, nitrates) through surface runoff and the decrease in dissolved-oxygen concentration, which reduces the self-purification capacity of water. In the cold period (mean EWQI = 1.85), a relative improvement in water quality is observed, caused by reduced biochemical activity, seasonal dilution of wastewater, and weaker thermal stratification.

The mean increment ΔEWQI = +0.61 for most sampling points indicates that the warm season is characterized by a higher level of ecological risk. The most problematic zones remain the Mykolaiv and Voznesensk sections, where EWQI in the warm season reaches 5–7, corresponding to very polluted and extremely polluted waters (Classes VI–VII).

The calculated values of the entropy-weighted water-quality index (EWQI) were integrated into a geoinformation environment for spatial analysis.

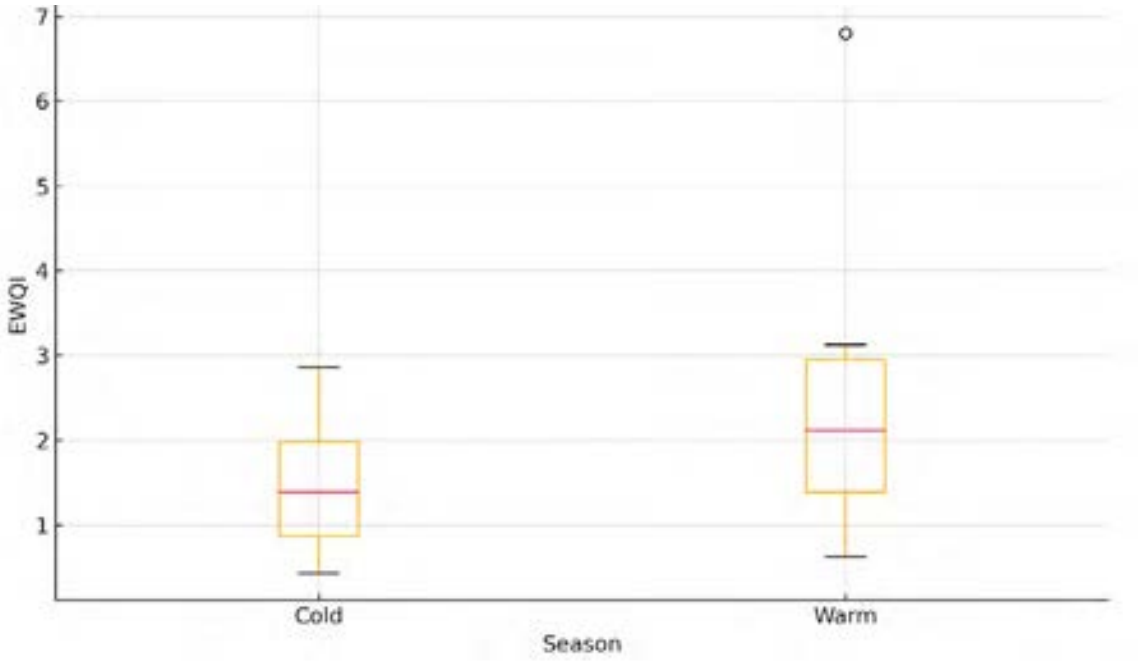


Fig. 1. Seasonal distribution of the entropy-weighted water-quality index (EWQI) across the Southern Bug River basin

Based on the coordinates of monitoring stations, two interactive maps (for the warm and cold periods) were created on the OpenStreetMap (OSM) platform, together with a ΔEWQI map showing the difference between warm and cold seasons.

The map for the warm period reveals a pronounced increase of EWQI in the middle and lower parts of the basin. Index values exceed 2.0 (Classes IV–V) in the areas near the cities Pervomaisk, Voznesensk, and Mykolaiv, indicating intensive organic and biogenic pollution. Meanwhile, the upper basin, particularly the Haivoron and Ladyzhyn regions, shows low index values (EWQI < 1), corresponding to Classes II–III–clean or moderately polluted waters.

On the cold-period map (Figure 3), the EWQI level decreases by approximately 0.3–1.0 units at almost all monitoring sites. The spatial structure becomes more uniform, and the proportion of areas classified as Classes IV–V is reduced by nearly half. This pattern indicates a seasonal self-purification of the river system, driven by reduced biochemical activity, lower surface runoff from agricultural lands, and the stabilization of the oxygen regime.

The map of seasonal changes in ΔEWQI (Figure 4) shows that the most intense deterioration in water quality (ΔEWQI > +1.0) occurs in the middle reach of the river–between Pervomaisk and Voznesensk–as well as in the estuarine zone near Mykolaiv. These areas can be considered critical zones of technogenic–ecological hazard, where the cumulative effects of industrial and agricultural discharges are most pronounced.

To identify spatial patterns and to group the monitoring sites by their ecological state, the k-means clustering method was applied to the dataset of EWQI values. The optimal number of clusters was determined using the Elbow criterion, which indicated the presence of four groups of water bodies with similar water-quality profiles (Table 2).

The analysis revealed that approximately 60% of monitoring sites belong to Classes III–V, indicating moderate to high pollution levels. At the same time, 17% of stations represent critical zones where EWQI exceeds 3.0, corresponding to very poor water quality. Mapping of cluster results allowed the delineation of five functional zones within the basin: Upper reaches – clean waters, low anthropogenic impact; Middle reaches – biogenic pollution from agricultural runoff and municipal sources; Tributaries – relatively stable zones with moderate quality; Urban–industrial areas – technogenically loaded, with high organic and nutrient inputs; Estuarine section – maximum ecological risk and cumulative pollution effects.

To identify the principal factors determining EWQI variability, a principal component analysis (PCA) was conducted. The first three principal components explained 82% of the total variance (Table 3).

The first factor (F1) reflects organic load associated with oxidative processes and shows the highest loadings for BOD_5, COD, and dissolved oxygen. The second factor (F2) represents nutrient (biogenic) pollution, primarily determined by ammonium, phosphates, and nitrates. The third factor (F3) characterizes mineralization processes, influenced by natural and anthropogenic inputs of sulfates and chlorides.

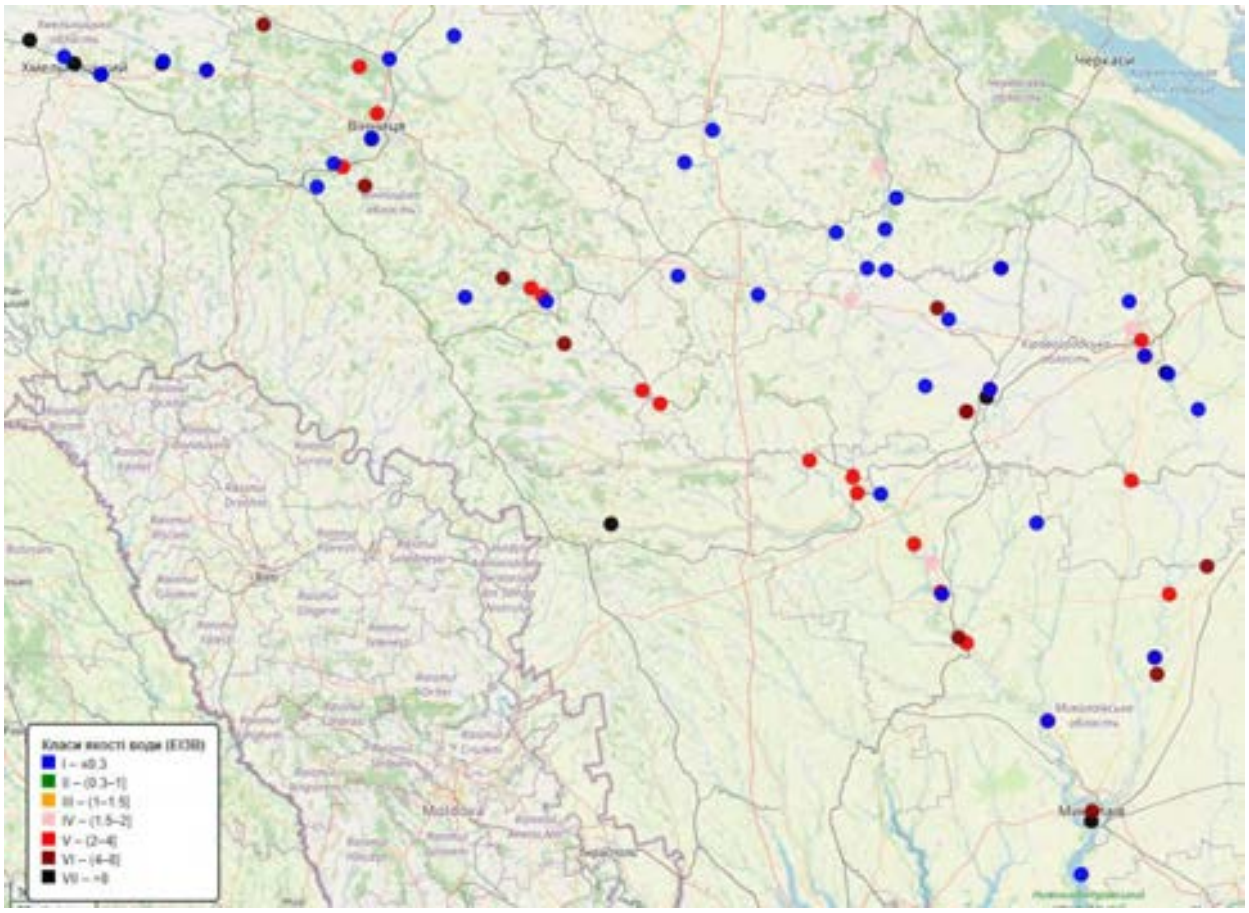


Fig. 2. Spatial distribution of the Entropy-Weighted Water Quality Index (EWQI) during the warm period (April–September) in the Southern Bug River basin

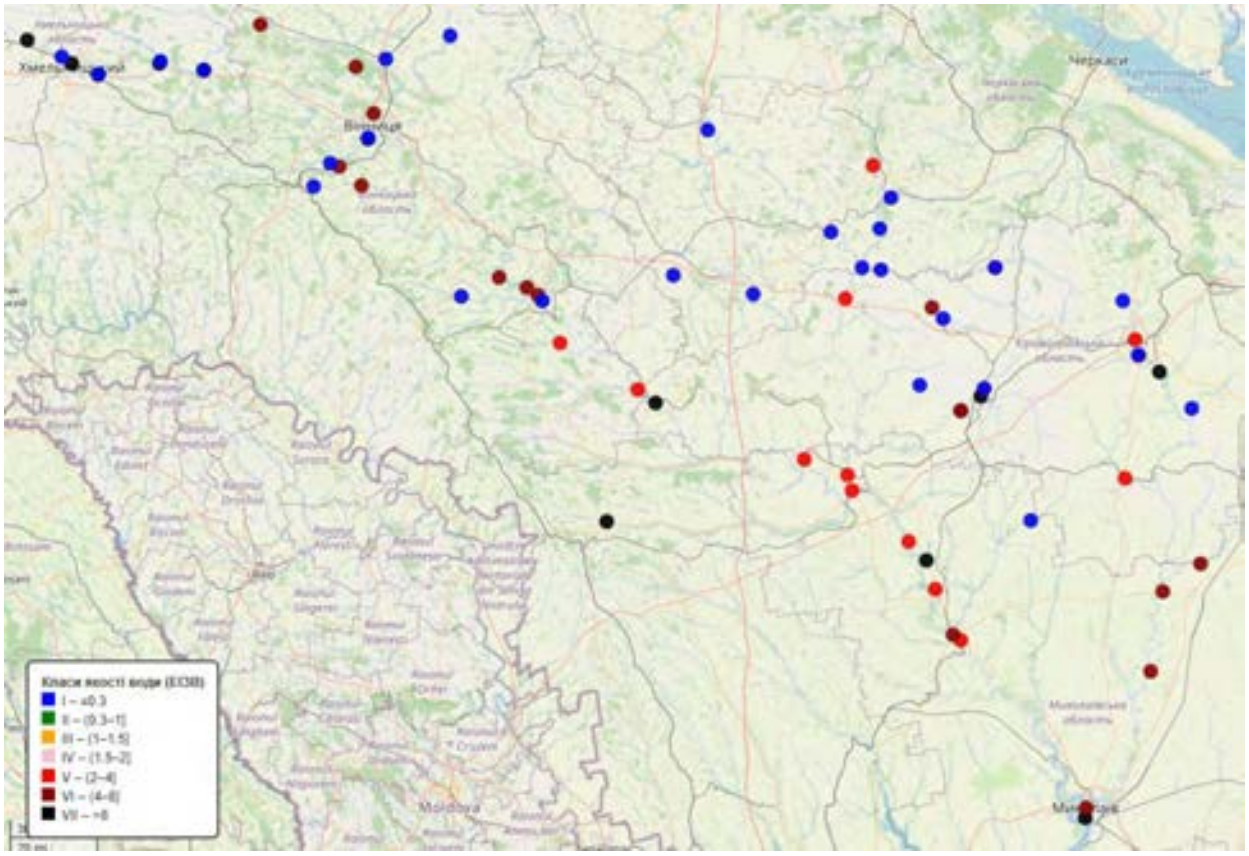


Fig. 3. Spatial distribution of the Entropy-Weighted Water Quality Index (EWQI) during the cold period (October–March) in the Southern Bug River basin

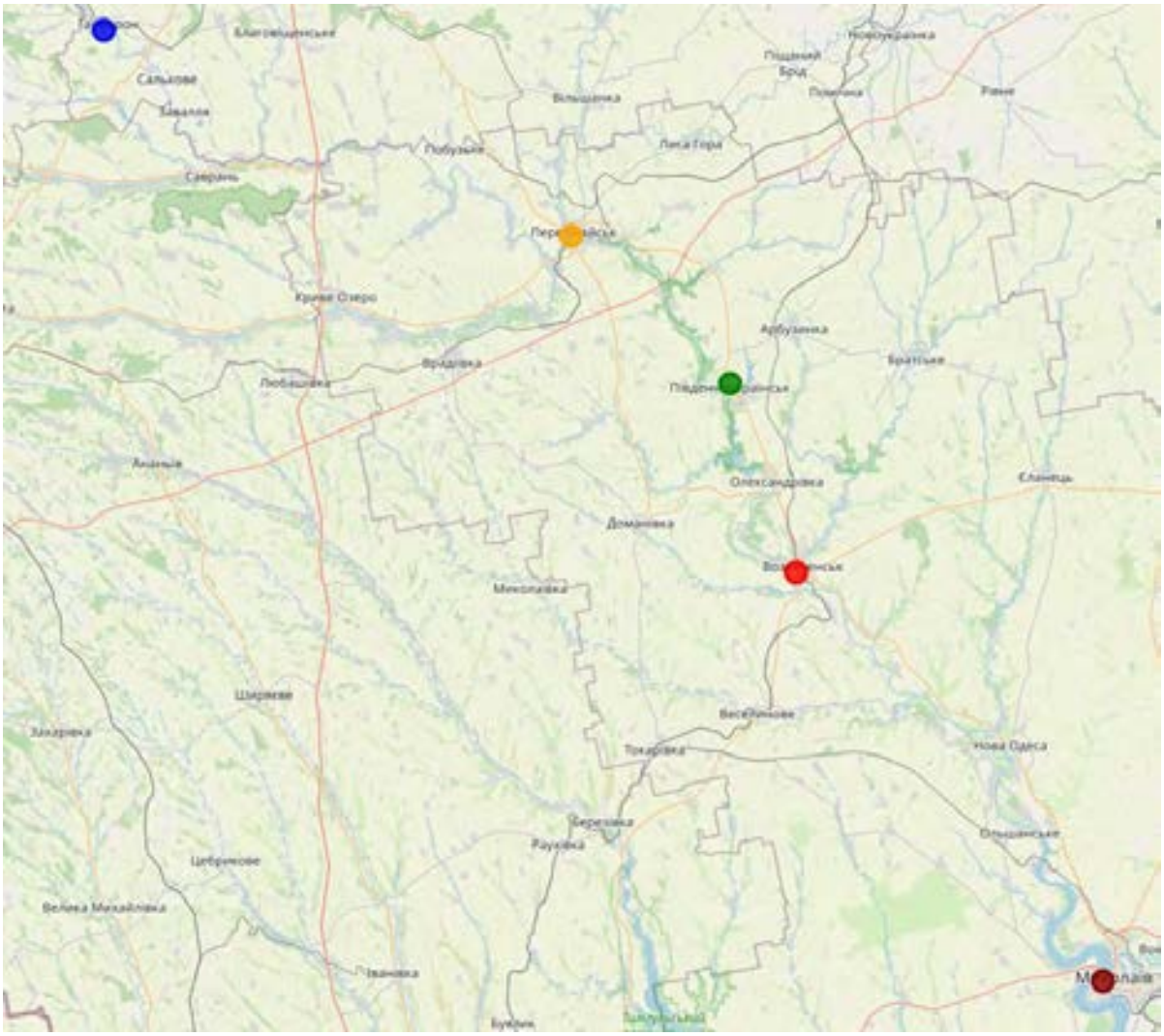


Fig. 4. Map of seasonal variations in the Entropy-Weighted Water Quality Index (ΔEWQI = EWQIwarm – EWQIcold) in the Southern Bug River basin

Table 2

Classification of monitoring sites based on the results of cluster analysis

Cluster	EWQI range	Water-quality characteristics	Typical sites	Share of sites, %
1	< 1.0	Clean or slightly polluted waters (Classes I–II)	Haivoron, Ladyzhyn	27
2	1.0–1.5	Moderately polluted (Class III)	Yuzhnoukrainsk, Trostianets	31
3	1.5–3.0	Polluted waters (Classes IV–V)	Pervomaisk, Voznesensk	25
4	> 3.0	Very and extremely polluted waters (Classes VI–VII)	Mykolaiv, estuarine section	17

Table 3

Factor loadings of principal components for hydrochemical indicators

Indicator	F1 – Organic load	F2 – Nutrient enrichment	F3 – Mineralization
BOD_5	0.89	0.21	0.12
COD	0.83	0.19	0.23
Dissolved oxygen	-0.77	-0.31	-0.18
Ammonium (NH_4^+)	0.34	0.87	0.09
Phosphates (PO_4^{3-})	0.27	0.81	0.15
Nitrates (NO_3^-)	0.22	0.76	0.29
Sulfates (SO_4^{2-})	0.11	0.18	0.84
Chlorides (Cl^-)	0.16	0.21	0.79

The resulting factor structure confirms that the environmental safety of the Southern Bug basin is primarily governed by a combined organic–biogenic pollution type. Seasonal analysis revealed that during the warm period, the importance of F2 (nutrient processes) increases, whereas in the cold period, F3 (mineralization) dominates–consistent with the natural hydrological and biochemical dynamics of the river system.

Based on the entropy weights and PCA results, the contribution of each indicator to the formation of the integral EWQI index was evaluated (Table 4).

Table 4

Contribution of main parameters to the formation of the entropy-weighted water-quality index (EWQI)

Indicator	Average entropy weight (W_i)	Contribution to EWQI, %	Type of impact
Ammonium (NH_4^+)	0.213	22.1	Biogenic pollution
Phosphates (PO_4^{3-})	0.172	17.8	Eutrophication effect
BOD_5	0.147	15.4	Organic load
COD	0.115	11.2	Chemical oxidation
Nitrates (NO_3^-)	0.096	9.1	Biogenic pollution
Dissolved oxygen	0.078	7.4	Inverse indicator of condition
Sulfates (SO_4^{2-})	0.072	6.9	Mineralization
Chlorides (Cl^-)	0.054	5.1	Salinity impact

The distribution of indicator contributions confirms that ammonium (22%), phosphates (18%), and BOD_5 (15%) are the dominant variables shaping the entropy-weighted index, aligning with the results of the PCA and the observed spatial patterns of biogenic and organic pollution across the basin.

Discussion

The combined contribution of the three key parameters (NH_4^+, PO_4^{3-}, and BOD_5) exceeds 55 %, indicating the decisive role of biogenic and organic pollution in shaping the environmental safety of the Southern Bug River basin. The spatial–seasonal and factor analysis demonstrated that the basin exhibits a mixed pollution pattern dominated by organic and nutrient compounds, especially during the warm season. The observed spatial heterogeneity is determined by the structure of land use: the upper reaches are mostly natural areas with low anthropogenic pressure, while the middle and lower reaches experience a persistent technogenic impact.

Both clustering and PCA confirmed that the water-use system and wastewater discharges are the principal factors degrading environmental safety. The obtained results have practical significance–they can be used to optimize the monitoring network, identify priority sampling sites, and develop targeted programs to reduce the biogenic load within the Southern Bug basin.

The results of the study confirmed that the entropy-weighted approach (EWQI) is an effective tool for quantitative assessment of the environmental safety of surface waters and for spatio-temporal analysis of the state of aquatic ecosystems. The proposed model not only provides an integrated evaluation of pollution levels, but also reveals the internal structure of processes determining water-quality variability across the basin.

The obtained EWQI values indicate a pronounced spatial heterogeneity and seasonal dynamics of hydrochemical conditions. The upper basin is characterized by stable water-quality parameters (Classes II–III), whereas the middle and lower reaches show a distinct increase in the index to Classes V–VII, reflecting substantial anthropogenic pressure.

The highest EWQI values were recorded in the Mykolaiv, Voznesensk, and Pervomaisk sections, whe-re during the warm period the index exceeds 6.0–classified as very polluted or extremely polluted waters.

Seasonal analysis revealed a consistent EWQI increase of 0.6–1.2 units in most sites during the warm period. This confirms the intensification of biogenic processes, the growth of ammonium, phosphate, and organic compound concentrations, and the resulting development of eutrophication phenomena. Conversely, during the cold period, the system shows relative stabilization of hydrochemical conditions, a reduction in nutrient load, and partial self-purification of surface waters.

The PCA results showed that over 80 % of total variance in the dataset is explained by three main factors–organic load, nutrient enrichment, and mineralization. This indicates that the ecological state of the basin is determined primarily by organic and biogenic pollution processes, intensified by anthropogenic activities such as industrial effluents, municipal wastewater, and agricultural runoff. At the same time, the mineralization factor dominates in the cold season, associated with the natural hydrogeochemical regime and low water exchange during winter.

Clustering of monitoring sites by EWQI made it possible to distinguish four ecological-state types that correlate with technogenic pressure and hydro-

logical features. This approach enables optimization of the hydrochemical-monitoring network: in stable areas the number of stations may be reduced, while in zones of high variability (Classes VI–VII) it is advisable to increase the observation frequency and broaden the range of controlled parameters.

The practical value of the developed model lies in its potential integration into the environmental-safety management system of the basin at both regional and national levels. The derived EWQI indices can serve as: indicators of ecological risk reflecting the current state of surface waters; criteria for ranking river-network sections by pollution level; an information basis for constructing ecological-hazard maps, basin zoning, and defining priority monitoring directions; a core element of water-resource management systems, integrated with spatial databases and GIS platforms (e.g., QGIS, ArcGIS, Python GIS).

The developed approach also possesses predictive potential: combining entropy-weighted methods with machine-learning and time-series analysis could enable forecasting of water-quality changes under various water-use and climate-change scenarios.

Thus, the entropy-weighted model for assessing environmental safety is a universal and scientifically grounded instrument that enables objective evaluation, monitoring, and management of surface-water conditions.

Its implementation in the national environmental-monitoring practice will enhance decision-making efficiency, reduce the risk of aquatic-ecosystem degradation, and strengthen the environmental safety of the Southern Bug River basin as an essential component of Ukraine's national water policy.

Conclusions

An entropy-weighted model for assessing the environmental safety of surface waters (EWQI) was developed and tested using the case of the Southern Bug River basin. The model integrates Shannon's information entropy theory with normalized hydrochemical parameters, enabling an objective evaluation of water pollution levels while accounting for spatial and seasonal variability.

Based on calculations for 36 monitoring stations (2020–2024), mean EWQI values ranged from 0.4 (clean waters) to 6.8 (extremely polluted sections). The poorest water quality was observed in the middle and lower reaches of the river, particularly near Mykolaiv, Voznesensk, and Pervomaisk, where pollution levels corresponded to Classes V–VII.

Seasonal analysis revealed that during the warm period (April–September), the level of pollution increased on average by 0.6–1.2 EWQI units, caused by the intensification of biogenic processes, eutrophication, and a decline in dissolved oxygen concentration.

The entropy-weight analysis of weighting coefficients showed that the primary contributors to the integral index are ammonium (22%), phosphates (18%), and biochemical oxygen demand (BOD_5, 15%), indicating the dominance of organic and biogenic pollution types in the basin.

Principal component analysis (PCA) identified three key process groups determining the ecological state of the river: F1 – Organic load (BOD_5, COD, dissolved oxygen), F2 – Nutrient enrichment (NH_4^+, NO_3^-, PO_4^{3-}), F3 – Mineralization (Cl^-, SO_4^{2-}).

Together, these factors explain over 80% of the total variance in hydrochemical data.

Cluster analysis of water bodies revealed five functional zones of the basin: Headwaters – clean waters (Classes I–II); Middle reach – biogenic pollution (Classes III–IV); Tributaries – hydrochemically stable sections; Urbanized areas – technogenic pressure (Classes V–VI); Estuarine zone – areas of highest ecological risk (Classes VI–VII).

This spatial zonation forms a scientific basis for targeted water-quality management.

The interactive EWQI and ΔEWQI maps, created using OpenStreetMap (OSM), provide visual representation of seasonal and spatial pollution structures and can be used to support environmental decision-making.

The practical value of the proposed model lies in its potential integration into the national environmental monitoring system as a tool for operational control, risk assessment, and environmental planning within surface-water basins of Ukraine.

The scientific novelty of this study lies in combining the entropy-based approach with spatio-seasonal modeling and cluster–factor analysis, which improves both the accuracy and objectivity of ecological-safety assessments for aquatic ecosystems.

References

1. *Bezsonnyi, V. L. (2022) Assessment of environmental risks from the impact of domestic and industrial effluents. Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (Monitoring 2022). 1–5. DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580218*
2. *Bezsonnyi, V. L., Ponomarenko, R. V., Tretyakov, O. V., Asotsky, V. V., & Kalynovskyi, A. Y. (2021). Regarding the choice of composite indicators of ecological safety of water in the basin of the Siversky Donets. Journal of Geology, Geography and Geoecology, 30(4), 622-631. https://doi.org/10.15421/112157*
3. *Bezsonnyi, V. L., Plyatsuk, L. D., Ponomarenko, R. V., Asotskyi, V. V., Tretyakov, O. V., & Zhuravskij, M. M. (2023). Integrated assessment of the surface source of water supply according to environmental-risk indicators. Journal of Geology, Geography and Geoecology, 32(3), 461-473. https://doi.org/10.15421/112341*

4. Bezsonnyi, V., Tretyakov, O., Plyatsuk, L., Ponomarenko, R., & Davydova, O. (2025). Seasonal and spatial dynamics of entropy-weighted water quality assessment in surface waters of Ukraine. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (62), 384-400. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-29
5. Pesce, S. F., & Wunderlin, D. A. (2000). Use of water quality indices to verify the impact of Cordoba city (Argentina) on Suquia River. Water Research, 34(11), 2915–2926. https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00036-1
6. Malovanyy, M., Boiaryn, M., Biedunkova, O., Voloshyn, V., & Netrobchuk, I. (2025). The The impact of the ecological sustainability of landscapes on the formation of the hydro-ecological state in the upper part of the Prypiat River basin. Ecological Questions, 36(2), 1–21. https://doi.org/10.12775/EQ.2025.018
7. Malovanyy, M. S., Boiaryn, M., Muzychenko, O., & Tsos, O. (2022). Assessment of the environmental state of surface waters of right-bank tributaries of the upper reaches of the Pripet River by macrophyte index MIR. Journal of Water and Land Development, (55), 97–103. http://doi.org/10.24425/jwld.2022.142310
8. Rylskyi, O. F., Dombrovskiy, K., Masikevych, Y., Masikevych, A., & Malovanyy, M. (2023). Evaluation of Water Quality of the Siret River by Zooperiphyton Organisms. Journal of Ecological Engineering, 24(6), 294–302. https://doi.org/10.12911/22998993/163166
9. Ponomarenko, R., Plyatsuk, L., Hurets, L., Polkovnychenko, D., Grigorenko, N., Sherstiuk, M., & Miakaiev, O. (2020). Determining the effect of anthropogenic loading on the environmental state of a surface source of water supply. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(10(105)), 4-10. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.206125
10. Liou, S.-M., Lo, S.-L., & Wang, S.-H. (2004). A generalized water quality index for Taiwan. Environmental Monitoring and Assessment, 96(1–3), 35–52. https://doi.org/10.1023/B:EMAS.0000031715.83752.a1
11. Said, A., Stevens, D. K., & Sehlke, G. (2004). An innovative index for evaluating water quality in streams. Environmental Management, 34(3), 406–414. https://doi.org/10.1007/s00267-004-0210-y
12. Adimalla, N. (2021). Application of the Entropy Weighted Water Quality Index (EWQI) and the Pollution Index of Groundwater (PIG) to Assess Groundwater Quality for Drinking Purposes: A Case Study in a Rural Area of Telangana State, India. Arch Environ Contam Toxicol 80, 31–40. DOI: https://doi.org/10.1007/s00244-020-00800-4
13. Zhang, J., Hao, Z., Liu, X., Wang, B., Guo, W., & Yan, J. (2024). Surface Water Quality Evaluation and Pollution Source Analysis at the Confluence of the Wei River and Yellow River, China. Water, 16(14), 2035. DOI: https://doi.org/10.3390/w16142035
14. Bezsonnyi, V. (2023). Use of the entropy approach in water resource monitoring systems. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (58), 302-320. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-23
15. Bezsonnyi, V., Plyatsuk, L., Ponomarenko, R., Tretyakov, O. (2023). Assessment of ecological safety of a surface water object [Mon23-155 Summary]. XVII International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment". https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520155
16. Havryshko, M., Popovych, O., Yaremko, H., Tymchuk, I., Malovanyy, M. (2022). Analysis of prospective technologies of food production wastewater treatment. Ecological Engineering & Environmental Technology, 23(2), 33–40. https://doi.org/10.12912/27197050/145201
17. Ugnenko, E. B., Yurchenko, V. O., Sorochuk, N. I., Melnikova, O. G., & Viselga, G. (2019). Study of treatment efficiency of wastewater collected from the surface of roads by natural zeolite. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 708(1), 012035. https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012035
18. Iurchenko, V., Tsytlishvili, K., Malovanyy, M. (2022). Wastewater treatment by conversion of nitrogen-containing pollution by immobilized microbiocenosis in a biodisk installation. Ecological Questions, 33(2), 21–30. https://doi.org/10.12775/EQ.2022.017
19. Shtepa, V., Plyatsuk, L., Ablieieva, I., Hurets, L., Sherstiuk, M., Ponomarenko, R. (2020). Substantiation of the environmental and energy approach of improvement of technological regulations of water treatment systems. Ecology and Environmental Technology, 11, Technology Audit and Production Reserves, 135/1. https://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.196948
20. Horoshkova, L., Menshov, O., Maslov, D., & Horoshkov, S. (2025). Environmental assessment of the war impact on the surface waters of the Dnipro River in the Zaporizhzhia City. In 18th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510052
21. Bezsonnyi V., Nekos A. Analysis of the environmental risk of water bodies in conditions of military danger. Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment. 17th International Conference 7–10 November 2023. Kyiv, Ukraine, Volume 2023, P. 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520153
22. Menshov, O., Horoshkova, L., Golub, A., & Horoshkov, S. (2025). Magnetic studies of sediments and soils as a tool for detection of dangerous geodynamic exogenic processes on the example of the Khortysya reserve. Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology, 1(108), 15-21. https://doi.org/10.17721/1728-2713.108.02
23. Menshov, O., Horoshkova, L., Horoshkov, S., & Dindaroglu, T. (2025). Comprehensive model of heavy metals content and magnetic properties of soil and sediments of lakes of Khortysya reserve. Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology, 2(109), 51-58. https://doi.org/10.17721/1728-2713.109.07
24. Hapich, H., Andrieiev, V., Kovalenko, V., Hrytsan, Yu., & Pavlychenko, A. (2022). Study of fragmentation impact of small riverbeds by artificial waters on the quality of water resources. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, (3), 185. https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-3/185

25. Hapich, H., Andrieiev, V., Kovalenko, V., Hrytsan, Yu., & Pavlychenko, A. (2022). Study of fragmentation impact of small riverbeds by artificial waters on the quality of water resources. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, (3), 185. https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-3/185
26. Horoshkova, L., Studinska, G., Mamchur, V., Menaker, A., & Menshov, O. (2024). Assessment of the impact of the Russian-Ukrainian war on the agrarian potential in Kherson region. Ekonomika APK, 31(6), 10-26. https://doi.org/10.32317/ekon.apk/6.2024.10
27. Zhang, D., Shi, J. X., Xu, H., Jing, Q., Pan, X., Liu, T., Wang, H., & Hou, H. (2020). A GIS-based spatial multi-index model for flood risk assessment in the Yangtze River Basin, China. Environmental Impact Assessment Review, 83, 106397. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106397 .
28. Bekele Emiru, K., Ren, Y., Zuo, S., Molla, A., Mekonnen Seka, A., & Ju, J. (2025). Combining spectral water index with band for surface water area extraction by using Google Earth Engine (GEE) and ArcGIS in the southern low mountain and hilly areas of China. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 39, 101650. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2025.101650
29. Mama, A.C., Bodo, W.K.A., Ghepdeu, G.F.Y., Ajonina, G.N. and Ndam, J.R.N. (2021). Understanding Seasonal and Spatial Variation of Water Quality Parameters in Mangrove Estuary of the Nyong River Using Multivariate Analysis (Cameroon Southern Atlantic Coast). Open Journal of Marine Science, 11, 103-128. https://doi.org/10.4236/ojms.2021.113008
30. Umwali, E.D., Kurban, A., Isabwe, A. et al. (2021). Spatio-seasonal variation of water quality influenced by land use and land cover in Lake Muhazi. Sci Rep 11, 17376. https://doi.org/10.1038/s41598-021-96633-9
31. Ubuoh, E.A., Nwogu, F.U., Ossai-Abeh, E. et al. (2024). Evaluation of hydro-chemical facies and surface water quality dynamics using multivariate statistical approaches in Southern Nigeria. Sci Rep 14, 31600. https://doi.org/10.1038/s41598-024-77534-z
32. Zhang, J., Hao, Z., Liu, X., Wang, B., Guo, W., & Yan, J. (2024). Surface Water Quality Evaluation and Pollution Source Analysis at the Confluence of the Wei River and Yellow River, China. Water, 16(14), 2035. https://doi.org/10.3390/w16142035

Ентропійно-зважена модель оцінювання екологічної безпеки поверхневих вод басейну річки Південний Буг

Віталій Безсонний
д. тех. н, доцент, кафедра готельного, ресторанного бізнесу і крафтових технологій,
Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, Харків, Україна

Метою дослідження є кількісне оцінювання екологічної безпеки поверхневих вод басейну річки Південний Буг на основі ентропійно-зваженої моделі (EWQI), що враховує просторово-часову мінливість гідрохімічних показників та їх інформаційну значущість. Було сформовано базу даних спостережень за 2020–2024 роки для 36 постів моніторингу та проведено нормування 12 основних показників якості води відповідно до ДСТУ 4808:2007. Ентропійні ваги розраховано за формулами Шеннона для визначення інформаційного внеску кожного параметра у загальний рівень забруднення. У результаті побудовано інтерактивні карти EWQI на основі OpenStreetMap для теплого (квітень–вересень) і холодного (жовтень–березень) періодів, а також карту сезонних змін ΔEWQI. Просторовий аналіз показав чіткий градієнт погіршення якості води вниз за течією – від чистих (класи II–III, EWQI ≤ 1,0) у верхів'ях до забруднених і дуже брудних (класи V–VII, EWQI > 3,0) у пригирловій частині. Середній рівень EWQI зріс із 1,85 у холодний період до 2,46 у теплий, що вказує на сезонне погіршення якості води на 33 %. Найбільший внесок у підвищення індексу мають амоній (22 %), фосфати (18 %) та $БСК_5$ (15 %), що відображає домінування біогенного й органічного забруднення. Аналіз головних компонент (PCA) показав, що три фактори – органічне навантаження, біогенне збагачення та мінералізація – пояснюють понад 80 % дисперсії даних. Просторова кластеризація дозволила виділити чотири типи екологічного стану річкових ділянок і зони критичного ризику в межах Миколаївської та Вознесенської ділянок. Основними обмеженнями дослідження є нерівномірна сезонна вибірка та обмежена кількість показників токсикологічного класу. Однак запропонована методологія може бути розширена шляхом інтеграції з геоінформаційними системами, машинним навчанням і супутниковими даними. Практична цінність моделі полягає у її придатності для автоматизованого оцінювання, картографування та управління якістю води у межах державної системи екологічного моніторингу. Наукова новизна полягає у поєднанні ентропійно-зваженого підходу, просторово-сезонного аналізу та факторної інтерпретації гідрохімічних процесів, що дозволяє підвищити об'єктивність оцінки екологічної безпеки водних екосистем.

Ключові слова*: ентропійно-зважений індекс, екологічна безпека, якість води, басейн Південного Бугу, гідрохімічні показники, сезонна динаміка, GIS, кластеризація, PCA, моніторинг поверхневих вод.*

Надійшла 15 липня 2025 р.
Прийнята 29 жовтня 2025 р.

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-39
УДК 504.064.2 (477.54)

Надійшла 4 серпня 2025 р.
Прийнята 7 листопада 2025 р.

Екогеохімічна оцінка забруднення важкими металами ґрунтового покриву Ізюмського району під впливом бойових дій

Юрій Буц [1]
д. техн. н., професор, завідувач кафедри охорони праці та навколишнього середовища,
[1] Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна,
e-mail: butsyura@ukr.net, https://orcid.org/0000-0003-0450-2617;
Олена Крайнюк [2]
к. техн. н., доцент, завідувач кафедри кібербезпеки,
[2] Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна,
e-mail: alenauvarova@ukr.net, https://orcid.org/0000-0001-9524-040X;
Валерій Сухов [3]
к. геол. н., зав. лаб., кафедра фундаментальної та прикладної геології,
[3] Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна,
e-mail: valery.sukhov@karazin.ua, https://orcid.org/0000-0001-5784-5248;
Анатолій Лісняк [3]
к. с.-г. н., доцент, кафедра екології та менеджменту довкілля,
e-mail: anlisnyak@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-5850-7328;
Лідія Катковнікова [1]
к. техн. н., доцент, кафедра охорони праці та навколишнього середовища,
e-mail: katkovnikova@kart.edu.ua, https://orcid.org/0000-0002-9843-2033

Військові дії на сході України завдали значної шкоди ґрунтам у зонах інтенсивних обстрілів. Метою роботи є оцінка екогеохімічного стану ґрунтового покриву Харківщини та визначення рівнів екологічного ризику забруднення важкими металами в місцях ракетних та артилерійських ударів. Дослідження проведено у форматі комплексної експедиції в Ізюмському районі Харківської області, що зазнав значних руйнувань від обстрілів. Експериментальна частина виконана в лабораторії «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем» (м. Харків). Методом атомно-абсорбційної спектроскопії визначено вміст токсичних елементів (Pb, Cd, Cu, Ni, Zn) та супутніх металів (Fe, Cr, Mn) для детальної характеристики геохімічного фону. Інтерпретація результатів базувалася на сучасних підходах до оцінки екологічного ризику. Насамперед визначався коефіцієнт забруднення, який показує, у скільки разів вміст ВМ перевищує природний фоновий рівень. Далі розраховувався геоакумуляційний індекс, що дозволяв встановити, чи є перевищення концентрацій наслідком саме техногенного впливу, зокрема військових дій. На завершальному етапі обчислювався інтегральний індекс потенційного екологічного ризику, який враховує токсичність кожного ВМ та прогнозує можливі наслідки його накопичення для екосистеми. Представлено результати комплексного дослідження хімічного забруднення ґрунтів у східній частині Харківської області, що постраждала від обстрілів та авіаційних ударів. На ключових ділянках Ізюмського району методом геоприв'язки відібрано зразки ґрунту з дванадцяти вирв від вибухів. За допомогою атомно-абсорбційної спектрометрії визначено концентрації Zn, Pb, Cu, Ni, Cr, Cd, Hg та інших важких металів. Дані свідчать про значне перевищення фонових рівнів токсичних елементів у ґрунтах, зокрема Zn, Pb та Cu, що безпосередньо пов'язано зі складом боєприпасів та залишками металевих уламків. Розраховані коефіцієнт забруднення, індекс гео-акумуляції та індекс потенційного екологічного ризику вказують на помірні та високі загрози для екосистеми на більшості ділянок. Найбільші показники ризику зафіксовані в місцях інтенсивних бомбардувань, що підтверджує тривалі негативні наслідки воєнних дій. Отримана оцінка обґрунтовує впровадження системи моніторингу довкілля та створює наукову базу для відновлення територій у післявоєнний період.

Ключові слова*: екогеохімічна оцінка, забруднення ґрунту, важкі метали, екологічний ризик, вплив військових операцій, Ізюмський район, моніторинг навколишнього середовища, відновлення ґрунтів.*

Як цитувати: Буц Юрій, Крайнюк Олена, Сухов Валерій, Лісняк Анатолій, Катковнікова Лідія (2025). Екогеохімічна оцінка забруднення важкими металами ґрунтового покриву Ізюмського району під впливом бойових дій. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*, (63), 530-541. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-39

In cites: Buts Yuriy, Krainiuk Olena, Sukhov Valeriy, Lisnyak Anatoliy, Katkovnikova Lidiya (2025). Ecogeochemical assessment of heavy metal contamination of the soil cover of the Izyum district under the influence of hostilities. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 530-541. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-39 [in Ukrainian]

Вступ. Бойові дії становлять суттєву небезпеку забруднення для навколишнього природного середовища [1-3], зокрема для ґрунтового покриву, який є основою екосистем та сільськогосподарського виробництва [4]. Ізюмщина – один з найбільш постраждалих регіонів Харківської області України, де інтенсивні ракетні та артилерійські обстріли призвели до великих лісових пожеж [5], утворення численних вирв і суттєвих геохімічних змін [6, 7]. Тобто регіон значною мірою характеризується численними белігеративними ландшафтними комплексами [8]. Забруднення ґрунтів важкими металами (ВМ) та продуктами детонації боєприпасів створює довготривалі ризики для екологічної безпеки регіону [9, 10]. Враховуючи масштаб і тривалість бойових

© Буц Юрій, Крайнюк Олена, Сухов Валерій, Лісняк Анатолій, Катковнікова Лідія, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

дій, актуальним є розроблення і застосування сучасних технологій моніторингу стану ґрунтів [11, 12], що дозволить своєчасно оцінювати ступінь забруднення, планувати заходи з ремедіації територій, а також оцінити вплив на здоров'я населення [13, 14].

Одним із ключових екологічних наслідків військових дій є забруднення ґрунтів важкими металами, що відбувається внаслідок розпаду вибухових речовин та металевих уламків [15, 16]. Зокрема, у місцях детонації боєприпасів можлива акумуляція таких ВМ, як свинець (Pb), кадмій (Cd), мідь (Cu), нікель (Ni) та цинк (Zn). Ці хімічні елементи мають високу токсичність, можуть мігрувати у глибші горизонти ґрунту та негативно впливати на розвиток та формування рослинності й мікроорганізмів [17].

Вибухи артилерійських снарядів, мін та ракет спричиняють комплексні зміни у ґрунтах [18]: від механічного руйнування структури до хімічного забруднення [19]. Під час детонації у ґрунт потрапляють фрагменти боєприпасів, вибухових речовин [20] та токсичні сполуки, зокрема важкі метали [17] – свинець (Pb), кадмій (Cd), мідь (Cu), нікель (Ni), цинк (Zn) та інші [21]. Ці хімічні елементи мають високу біоакумулятивну здатність і значну токсичність, що призводить до деградації ґрунтів, погіршення стану екосистем та загрози для здоров'я населення. Інтеграція сучасних аналітичних підходів та цифрових технологій обробки даних (за допомогою Python) забезпечила формування системи моніторингу екогеохімічного складу ґрунтів, що включає розрахунок екологічних індексів і побудову наочних графічних моделей (діаграм, теплових карт), при цьому розроблений код доступний у відкритому доступі на GitHub для відтворення та подальшого використання [2].

Отже, військові конфлікти завдають ґрунтам і екосистемам значної шкоди, що проявляється у фізичній, хімічній та біологічній деградації. Для збереження рівня екологічної безпеки критично важливі сучасний моніторинг, науково обґрунтовані стратегії ремедіації та міжнародна співпраця.

Мета дослідження. Метою дослідження є оцінка впливу бойових дій на екогеохімічний склад ґрунтів Харківщини із застосуванням сучасних методів моніторингу та лабораторного аналізу, а також визначення рівня екологічного ризику забруднення важкими металами у зонах ракетних та артилерійських обстрілів.

Для досягнення мети передбачено виконання наступних завдань:

1. Організувати відбір ґрунтових зразків у вирвах від вибухів із використанням GPS-координат та фотофіксації.

2. Визначити концентрації важких металів у відібраних зразках за допомогою атомно-абсорбційної спектрометрії.

3. Порівняти результати з фоновими показниками.

4. Оцінити екологічний ризик та окреслити напрями застосування отриманих даних у системах моніторингу довкілля і плануванні ремедіації.

Матеріали і методи досліджень. Дослідження здійснювалося у форматі комплексної експедиції, організованої в межах Ізюмського району, на сході Харківської області – регіону, що зазнав найбільшого руйнування від артилерійських обстрілів і бомбардувань.

Ґрунти регіону представлені переважно чорноземами та темно-сірими лісовими ґрунтами, які характеризуються високим вмістом гумусу (від 5 до 8 %) та високим рівнем родючості. Вони мають значну буферну здатність і стійкість до деградаційних процесів. Однак, військові дії, включаючи детонацію боєприпасів, механічні пошкодження та вплив важкої техніки, спричинили локальне порушення структури ґрунтового покриву [11]. Вибухи снарядів призвели до утворення вирв, деструкцію ґрунтових горизонтів та порушення природного дренажу, що може спричинити зміну фізико-хімічних властивостей ґрунту [21, 22].

До завдань дослідження було отримати репрезентативні дані щодо впливу бойових дій на ґрунтовий покрив та визначити рівень концентрації ВМ у місцях детонації боєприпасів. Для забезпечення точності та надійності досліджень застосовувались такі етапи відбору:

Попередня підготовка. Визначення та картографування місць відбору зразків ґрунту за допомогою геоінформаційних технологій. Вибір локацій здійснювався на основі аналізу супутникових знімків та польового обстеження уражених земель.

Процедура відбору. Щоб виключити ризик вторинної контамінації, ґрунт відбирали за методикою комбінованого відбору з поверхневого шару (0–20 см) стерильним буром у 12 точках, розташованих у вирвах від вибухів артилерійських снарядів. Відбір здійснювався у листопаді 2024 року.

У сучасних дослідженнях також пропонується інноваційний підхід до відбору зразків ґрунту з вирв артилерійських снарядів для точнішої ідентифікації забруднення та визначення впливу конкретних типів боєприпасів [23], однак нами використаний класичний підхід із відбором зразків у центрі кратера, на середині радіусу та на його краю для комплексної оцінки рівня забруднення [18, 24]. Для подальшого аналізу у статті використані усереднені значення концентрацій ВМ, розраховані за результатами вимірювань з кожної зони вирви.

Для визначення природного (фонового) рівня забруднення додатково відбиралися контрольні зразки ґрунту на відстані 500–1000 м від зони ураження, у напрямку, протилежному переважаючим вітрам, на території, де відсутні сліди військової діяльності чи техногенного впливу. Відбір фонових зразків здійснювався за аналогічною методикою та з тієї ж глибини (0–20 см), що забезпечує коректність порівняння результатів.

Документування. Для кожного зразка фіксувалися точні координати за допомогою GPS. Виконувалася фотофіксація місць відбору. Заповнювалися польові протоколи з описом фізичних характеристик ґрунту (колір, структура, наявність видимих сторонніх включень). Для кожної точки здійснювали документування координат за допомогою GPS та фотофіксацію.

Транспортування та зберігання. Зразки поміщали у герметичні пластикові контейнери, транспортували до лабораторії в ізольованих умовах і зберігали у прохолодному, захищеному від світла приміщенні до моменту аналізу.

Дана методика дозволяє мінімізувати вплив зовнішніх факторів на якість зразків та забезпечує достовірність отриманих результатів під час подальшого лабораторного аналізу.

Експериментальні дослідження проводилися в лабораторії еколого-аналітичних досліджень на базі Науково-дослідної установи «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем» (УКРНДІЕП) (м. Харків). Основним методом визначення концентрації ВМ обрано атомно-абсорбційну спектроскопію (AAS), що забезпечує високу чутливість і точність вимірювань. Аналіз охоплював ключові токсичні хімічні елементи – свинець (Pb), кадмій (Cd), мідь (Cu), нікель (Ni) і цинк (Zn), а також низку супутніх важких металів (Fe, Cr, Mn), які дозволяли істотніше охарактеризувати геохімічний фон.

Інтерпретація результатів базувалася на сучасних підходах до оцінки екологічного ризику. Для цього було використано низку інтегральних індексів: коефіцієнт забруднення (Contami-nation Factor, CF), що показує, у скільки разів вміст важких металів перевищує природний фон (запропонований Hakanson [25] у 1980 році для кількісної оцінки ступеня забруднення окремими металами відносно природного фону); геоакумуляційний індекс (Geoaccumulation Index, Igeo), який дозволяє встановити техногенний характер перевищень, зокрема наслідки військових дій (вперше розроблений Müller [26] у 1969 році для порівняння сучасних концентрацій металів із докомінновими значеннями); а також інтегральний індекс потенційного екологічного ризику (Potential Ecological Risk Index, PERI), що враховує токсичність окремих хімічних елементів і дає змогу прогнозувати можливі наслідки їхнього накопичення для екосистем (також запропонований Hakanson [25] у 1980 році для комплексної оцінки потенційного ризику забруднення для біоти).

Отримані показники стали основою для побудови просторової моделі розподілу забруднення ґрунтів. На її базі розроблено концепцію «розумного моніторингу» – інтегрованої системи, яка поєднує лабораторні вимірювання, геоінформаційні технології та автоматизований збір польових даних. Такий підхід дозволяє створити адаптивну мережу контролю, здатну відстежувати динаміку забруднення у режимі реального часу та своєчасно сигналізувати про критичні зміни в стані ґрунтів на територіях, постраждалих від бойових дій. Це дозволило отримати достовірні результати щодо рівня екологічної небезпеки, оцінити масштаби забруднення та спрогнозувати його вплив на довкілля й здоров'я населення, а також окреслити подальші напрями ремедіації постраждалих територій.

Результати дослідження.

Для оцінки рівня геохімічного забруднення були відібрані 36 зразків ґрунту у місцях формування 12 вирв від артилерійських снарядів та авіабомб на землях сходу Харківської області. Відбір здійснювався в межах міст Ізюма, Борової, Балаклії, сел. Кам'янки, Веприцький хутітр та прилеглих населених пунктів, що зазнали інтенсивних обстрілів (рис. 1). Такий підхід дозволив простежити особливості акумуляції ВМ саме у зонах безпосереднього ураження (табл. 1).

Аналіз концентрації важких металів. Лабораторний аналіз зразків ґрунту відібраних з місць детонації снарядів і бомб на сході Харківської області, показав значні відмінності у концентрації ВМ, порівняно з фоновими рівнями, що фіксуються для чорноземів регіону. Найбільш виражене перевищення виявлено для цинку (Zn), свинцю (Pb) та міді (Cu), що безпо-середньо пов'язано з хімічним складом боєпри-пасів та металевих уламків, які потрапляють у ґрунт після вибухів.

Проведений лабораторний аналіз засвідчив, що у зразках ґрунту з вирв від артилерійських снарядів спостерігається істотне зростання вмісту ВМ у зіставленні з фоновими концентраціями (табл. 2, рис. 2). Найбільш помітні аномалії зафіксовані для свинцю (Pb), цинку (Zn), міді (Cu) та хрому (Cr), що свідчить про їхній зв'язок із залишками боєприпасів та їх металевими уламками.

Зокрема, концентрація Zn у більшості зразків коливалася від 23 до 240 мг/кг, при цьому максимальні значення зафіксовано у зразку № 11 (240 мг/кг) – у зоні інтенсивних обстрілів, де спостерігалася велика кількість уламків техніки та фрагментів боєприпасів. Вміст Pb, одного з най-



Рис 1. Місця відбору зразків ґрунту / Fig 1. Soil sampling locations

Таблиця 1 / Table 1

Місця відбору зразків ґрунту / Soil sampling locations

№	Координати	Місце розташування
1.	49°28'08.8"N 36°53'03.4"E	м. Балаклія, Харківська обл. Біля АЗС Укргазвидобування
2.	49°27'07.7"N 36°53'57.1"E	м. Балаклія, Харківська обл.
3.	49°27'05.2"N 36°53'58.0"E	м. Балаклія, Харківська обл.
4.	49°28'08.8"N 36°53'03.4"E	с. Борова, Харківська обл. (ліс, Борівська Дача)
5.	49°10'23.9"N 37°16'35.0"E	м. Ізюм Харківська обл.
6.	49°10'24.6"N 37°16'34.9"E	м. Ізюм Харківська обл.
7.	49°10'38.8"N 37°16'33.2"E	м. Ізюм Харківська обл. (біля меморіального парку «Гора Крем'янець»)
8.	49°10'38.1"N 37°16'35.1"E	м. Ізюм Харківська обл.(біля меморіального парку «Гора Крем'янець»)
9.	49°10'37.0"N 37°16'33.9"E	м. Ізюм Харківська обл. (біля меморіального парку «Гора Крем'янець»)
10.	49°09'06.1"N 37°16'41.4"E	с. Веприцький хутір, Ізюмський район Харківська обл.
11.	49°07'06.1"N 37°17'25.1"E	с. Кам'янка, Харківська обл. (берег р. Греківка)
12.	49°07'04.6"N 37°17'26.7"E	с. Кам'янка, Харківська обл.

більш токсичних хімічних елементів, у ряді зразків перевищував 60 мг/кг, а у двох випадках досягав 72–85 мг/кг, що є серйозним екологічним сигналом, оскільки Pb має високу мобільність і здатність до біоакумуляції.

Мідь (Cu), яка часто використовується у сплавах для виготовлення снарядів, також демонструє підвищені показники – від 11 до 71 мг/кг. У кількох зразках (№ 2, 5, 11) спостерігалося перевищення фонового рівня більше ніж в 3 рази. Концентрації Fe закономірно були найвищими серед усіх досліджених ВМ (від 6 100 до 48 000 мг/кг), що пояснюється як природним вмістом Fe у чорноземах та темно-сірих лісових ґрунтах, так і надходженням цього металу внаслідок руйнування боєприпасів і військової техніки.

Кадмій (Cd) і ртуть (Hg) виявлено у незначних концентраціях (ртуть – здебільшого нижче межі визначення у 0,025 мг/кг), проте навіть мінімальні кількості цих хімічних елементів становлять суттєву загрозу, зважаючи на їхню високу токсичність. Хром (Cr) та нікель (Ni) продемонстрували локальні перевищення (Cr – до 56 мг/кг, Ni – до 39 мг/кг), що свідчить про можливе використан-

Таблиця 2 / *Table 2*

Результати геохімічного аналізу: масова частка важких металів у зразках ґрунту, мг/кг /
Results of geochemical analysis: mass fraction of heavy metals in soil, mg/kg

№ зразок	Zn	Pb	Hg	Cu	Fe	Cr	Ni	Mn
1 зразок	50	60	<0,025	14	6100	11	5,9	150
2 зразок	67	45	0,035	20	13200	29	15	220
3 зразок	44	19	<0,025	13	9400	22	10	175
1-2-3 фон	37	9	<0,025	6	8500	16	10	165
4 зразок	53	72	0,085	17	9800	21	11	180
5 зразок	95	67	0,055	29	17800	42	22	300
4-5 фон	46	13	<0,025	8	8300	17	10	180
6 зразок	31	10	<0,025	11	20000	40	24	250
6 фон	23	12	<0,025	5	16000	18	10	225
7 зразок	100	39	0,025	25	16000	33	20	280
8 зразок	120	85	0,095	33	21000	50	30	450
7-8 фон	52	10	<0,025	11	12800	12	11	240
9 зразок	23	8,3	<0,025	14	8800	17	9,4	170
10 зразок	36	15	<0,025	16	7600	19	8	190
9-10 фон	33	10	<0,025	6	7200	14	11	185
11 зразок	240	38	<0,025	71	48000	56	39	610
11 фон	59	21	<0,025	19	16500	16	17	368
12 зразок	89	58	0,045	27	15400	35	18	260
12 фон	41	5	<0,025	14	13400	17	10	255

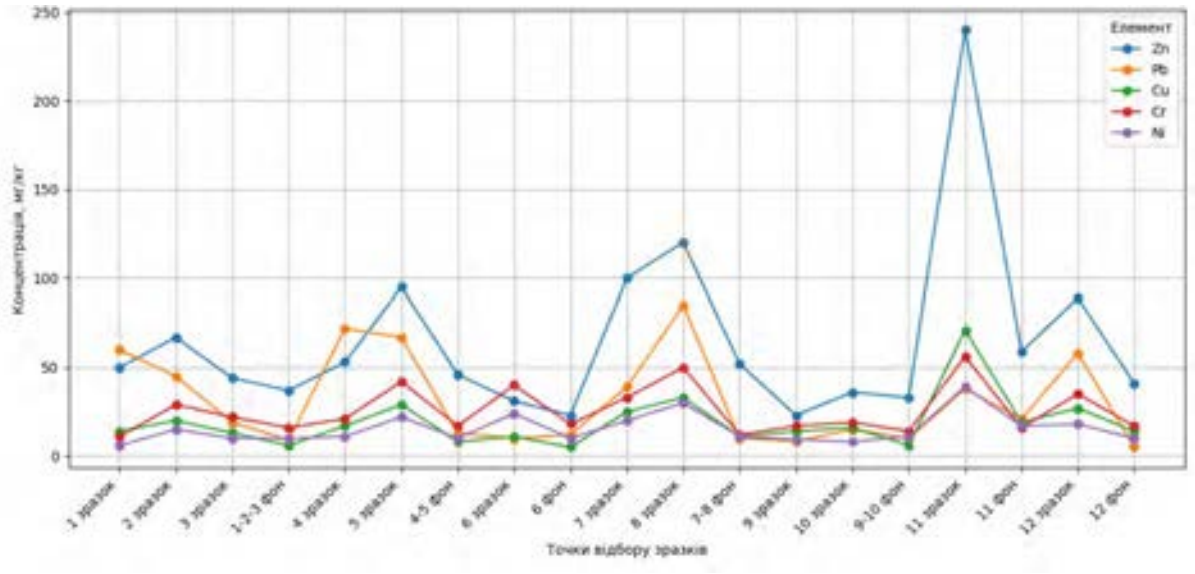


Рис. 2. Порівняння концентрацій важких металів у ґрунтових зразках та фонових значеннях, мг/кг /
Fig. 2. Comparison of heavy metal concentrations in samples and background values, mg/kg

ня легованих сталей у снарядах та осколках.

Загалом отримані дані демонструють чітку тенденцію: у місцях активних бойових дій ґрунти характеризуються локальними, але дуже високими концентраціями окремих ВМ, що підтверджує прямий зв'язок між військовими діями та екологічним станом території. Ці результати стали основою для подальшої оцінки рівня забруднення за індексами CF, Igeo та PERI, а також для моделювання просторового розподілу токсичних хімічних елементів у ґрунтовому покриві.

Свинець (Pb) у більшості зразків перевищує фонові показники у 3–5 разів, особливо у зразках 4, 5 та 8 (до 85 мг/кг проти фонового рівня 10–13 мг/кг). Це підтверджує, що Pb є основним маркером вибухової та вогнепальної активності.

Цинк (Zn) демонструє нерівномірний розподіл: у зразку 11 концентрація сягнула 240 мг/кг, що майже у 4 рази вище за фон. Подібні сплески можуть бути пов'язані з використанням цинкових сплавів у оболонках снарядів.

Мідь (Cu) показала перевищення у 2–3 рази у більшості зразків (максимум у зразку 11–71 мг/кг), що відповідає застосуванню міді у де-

тонаторах та капсулях.

Хром (Cr) та нікель (Ni) локально фіксують сильні підйоми, особливо в зразках 6, 8 та 11 (Cr – до 56 мг/кг, Ni – до 39 мг/кг), що може свідчити про їхнє надходження з фрагментів сталі та броні.

Ртуть (Hg) виявлена у слідових кількостях (0,025–0,095 мг/кг), але в окремих зразках (4, 5, 8) спостерігається підвищення у 3–4 рази відносно фону, що може вказувати на залишки вибухових речовин, які містять ртутні сполуки.

Залізо (Fe) та марганець (Mn) в цілому демонструють природне походження, але у зразках 11 та 6 зафіксовано значне зростання (Fe – до 48 000 мг/кг, Mn – до 610 мг/кг), що пояснюється вмістом сталевих уламків у зоні вибуху.

Особливо відрізняється зразок 11 (Балаклія), де зафіксовано максимальні значення майже за всіма показниками (Zn, Cu, Fe, Cr, Ni, Mn). Це може свідчити про масоване ураження території важкими боєприпасами та накопичення ВМ у ґрунті після детонації.

В цілому, результати демонструють, що бойові дії спричиняють локальне, але дуже інтенсивне забруднення, з різким зростанням концентрацій токсичних ВМ у місцях вибухів. Найнебезпечнішими є ділянки із високим вмістом Pb, Cu та Zn, які мають тенденцію до міграції у глибші шари ґрунту, створюючи довгостроковий екологічний ризик.

Аналіз коефіцієнтів забруднення.

Коефіцієнт забруднення. (коефіцієнт концентрації, CF Contamination Factor) показує у скільки разів концентрація хімічного елемента у зразку перевищує фон. Розрахунок коефіцієнта забруднення (CF) для кожного з досліджуваних ВМ показав суттєву варіабельність рівня техногенного навантаження на ґрунти в межах досліджуваних територій (рис. 3). Найбільш критичні значення CF зафіксовані для заліза (Fe) та цинку (Zn), що в окремих зразках перевищують фонові концентрації у 2–4 рази, відображаючи інтенсивне надходження цих елементів у результаті руйнування боєприпасів та металевих конструкцій. Значне забруднення виявлено також для свинцю (Pb) та міді (Cu) – у більшості ключових точок CF перевищує 3, що свідчить про суттєвий антропогенний вплив та потенційну небезпеку для екосистеми.

Для нікелю (Ni), марганцю (Mn) та хрому (Cr) спостерігаються помірні відхилення від фонових значень (CF у межах 1–2), що може бути пов'язано як із внеском військових дій, так і з природними екогеохімічними особливостями ґрунтів. Особливої уваги потребує вміст ртуті (Hg): хоча її концентрації залишаються відносно низькими, коефіцієнт забруднення подекуди перевищує 2, вказуючи на локальні джерела надходження цього токсичного хімічного елементу.

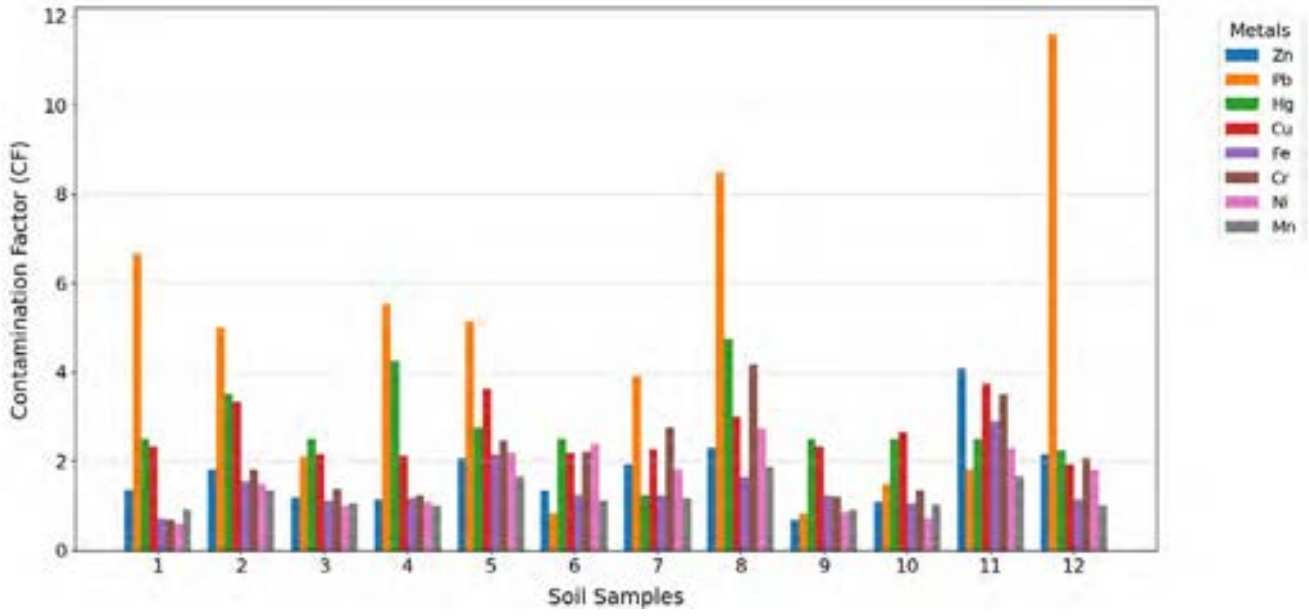


Рис. 3. Коефіцієнт забруднення (КЗ) важкими металами у зразках ґрунту /
Fig. 3. Contamination Factor (CF) for Heavy Metals in Soil Samples

Отримані результати засвідчують формування складного спектра «металевого» забруднення внаслідок бойових дій, з домінуванням хімічних елементів конструкційного походження (Fe, Zn, Cu, Pb). Це підкреслює необхідність комплексного моніторингу та пріоритетної уваги до територій з найбільшими CF, де ризики для довкілля є найбільш вираженими.

Індекс геоакуміляції. Для оцінки ступеня забруднення ґрунту ВМ було розраховано індекс геохімічного забруднення (Igeo) за формулою Мюллера:

$$I_{geo} = \log_2\left(\frac{C_{metal}}{1{,}5 \cdot C_{background}}\right)$$

де: C_{metal} – концентрація важкого металу у зразку, мг/кг;

$C_{background}$ – фонова концентрація важкого металу для даного регіону, мг/кг;

1,5 – коригуючий коефіцієнт, що враховує природні геохімічні варіації.

Індекс геоакумуляції (Igeo) використовується для визначення антропогенного впливу на концентрацію ВМ у ґрунтах. Цей показник враховує природні коливання фонових концентрацій за допомогою коригуючого коефіцієнта, що робить оцінку більш точною і дозволяє виділити рівні забруднення за шкалою від незабрудненого до надзвичайно сильно забрудненого середовища (Müller, 1969). Таким чином, на рис. 3 представлені результати комплексного аналізу геохімічного забруднення важкими металами в зоні дослідження, що дає можливість ідентифікувати локальні вогнища забруднення і планувати подальші заходи екологічного моніторингу та ремедіації.

У наших дослідженнях Igeo був розрахований для важких металів, таких як цинк, свинець, ртуть, мідь, хром, нікель та марганець. Аналіз засвідчив, що найбільш виражене техногенне забруднення спостерігається для свинцю та ртуті, де значення Igeo у деяких зразках перевищують 2, що відповідає категорії «помірно сильне» та «сильне забруднення» (рис. 3). Це підтверджує гіпотезу про значний вплив військових дій на стан ґрунтового покриву в цьому регіоні.

Показник сумарного екологічного ризику

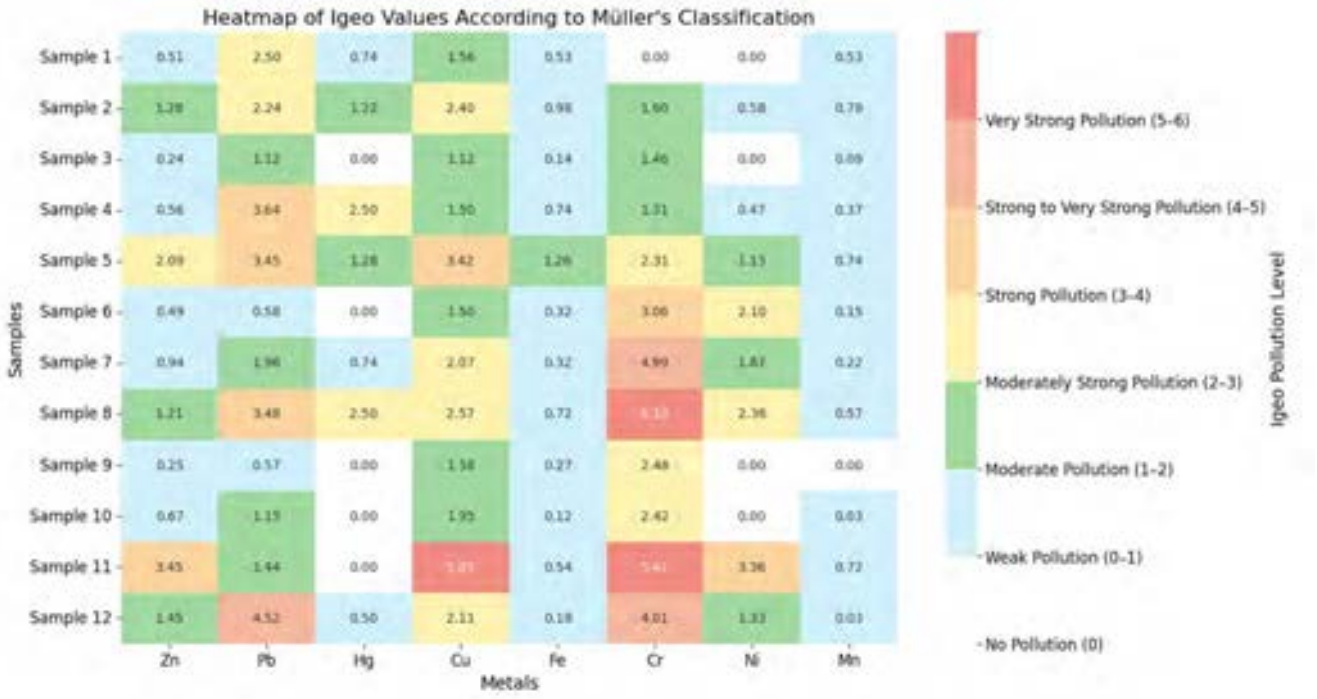


Рис. 4. Теплова карта значень Igeo згідно з класифікацією Мюллера /
Fig. 4. Heatmap of Igeo Values According to Müller's Classification

(Potential Ecological Risk Index, PERI*)* – це інтегральний індекс, який оцінює потенційний екологічний ризик, пов'язаний із забрудненням ґрунту ВМ. Він враховує як концентрацію важкого металу у зразку, так і його токсичність. Формула розрахунку для кожного металу:

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_f^i$$

де

E_r^i – потенційний екологічний ризик для металу,

T_r^i – токсичний коефіцієнт металу,

$C_f^i = C_i/B_i$ – коефіцієнт забруднення (концентрація важкого металу у зразку поділена на фонову концентрацію).

Сумарний індекс PERI розраховується як сума ризиків усіх ВМ у зразку.

Жоден із зразків не продемонстрував надзвичайно високого рівня ризику, проте у більшості випадків показник PERI перевищує 160, що свідчить про високий потенційний ризик для екосистеми. Найбільші значення зафіксовано у зразках № 8 (PERI = 275,3) та № 4 (PERI = 219,6), що вказує на значне сумарне навантаження ВМ, ймовірно пов'язане з інтенсивними бойовими діями та руйнуванням ґрунтового покриву.

Зразки № 6, 7, 9 та 10 мають нижчі значення PERI (99,8–135,3), які відповідають значному, але не критичному ризику. Це може бути зумовлено як меншою концентрацією токсичних ВМ, так і

більш стабільними ґрунтовими умовами.

Градація індексу PERI (за Håkanson, 1980)

PERI < 150 → *низький ризик*

150 ≤ PERI < 300 → *помірний ризик*

300 ≤ PERI < 600 → *високий ризик*

PERI ≥ 600 → *дуже високий ризик*

Діаграма (рис. 4) наочно демонструє просторову неоднорідність ризику:

– зелені та жовтогарячі відтінки відповідають зразкам із помірним та значним ризиком;
– червоні відтінки позначають ділянки з високим рівнем небезпеки для довкілля.

Важливо підкреслити, що жоден із досліджених пунктів не можна вважати «безпечним» – навіть мінімальні значення PERI перевищують 99, що потребує екологічного моніторингу та подальшої рекультивації територій. Таким чином, аналіз PERI вказує на необхідність оцінки довгострокових екологічних наслідків та визначення пріоритетних зон для відновлення ґрунтів (рис. 5).

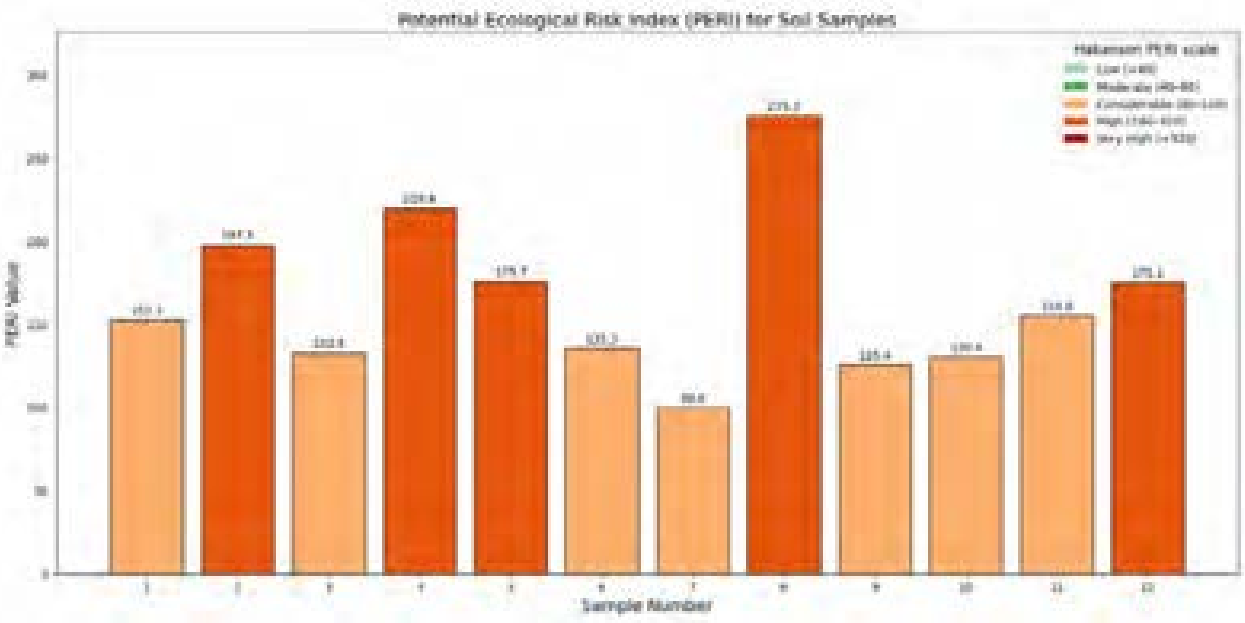


Рис. 5. Індекс потенційного екологічного ризику (PERI) для зразків ґрунту /
Fig. 5. Potential Ecological Risk Index (PERI) for Soil Samples

Вплив складу боєприпасів на хімічне забруднення ґрунтів. Сучасні боєприпаси, які активно використовуються у збройних конфліктах, містять широкий спектр хімічних компонентів, які після вибуху або розкладання здатні спричиняти суттєве хімічне забруднення довкілля, зокрема ґрунтів. До основних токсичних елементів, що входять до складу боєприпасів, окрім важких металів (свинець, мідь, кадмій, цинк, нікель), належать вибухові речовини (тринітротолуол (ТНТ), гексоген (RDX), октоген (HMX)) та продукти їхнього термічного або механічного розкладу [27, 28].

Після використання артилерії, ракетних систем, міномётів чи авіаційних засобів ураження, ці речовини потрапляють у ґрунт як у вигляді дрібнодисперсних залишків снарядів, так і в результаті фугасної чи осколкової дії. Значна частина ВМ та органічних сполук довготривало зберігається у ґрунтовому середовищі, негативно впливаючи на мікрофлору, гальмуючи розвиток рослинності та порушуючи природні біогеохімічні процеси [29].

Результати досліджень, проведених у районах інтенсивних бойових дій (зокрема, на прикладі Ізюмського району Харківської області), засвідчують підвищений вміст свинцю, міді та нітроароматичних сполук у ґрунтах поблизу місць детонацій [11, 21]. Порівняльний аналіз із фоновими даними підтверджує техногенне походження цих забруднень. Особливо небезпечним є локальне зосередження вибухових залишків, що не лише ускладнює відновлення екосистем, але й створює додаткові ризики для цивільного населення.

Таким чином, хімічне забруднення ґрунтів унаслідок бойових дій є безпосередньо пов’язаним зі складом боєприпасів, що використовуються у збройному конфлікті. Ці наслідки мають кумулятивний характер і потребують подальшого моніторингу, картографування зон ризику та розроблення стратегії ремедіації та рекультивації.

Проведені розрахунки індексів забруднення (CF), геоакумуляційного індексу (Igeo) та індексу потенційного екологічного ризику (PERI) дозволили комплексно охарактеризувати ступінь техногенного навантаження на ґрунти дослідженої території. Отримана екогеохімічна оцінка свідчить про локальні зони підвищеного ризику, що вимагають першочергового втручання та конт-

ролю. Застосування запропонованих підходів забезпечує створення науково обґрунтованих систем екологічного моніторингу, здатних оперативно відстежувати зміни у складі ґрунтів та визначати пріоритетні ділянки для рекультивації. На основі отриманих даних можуть бути розроблені стратегії ремедіації та післявоєнного відновлення територій, уражених бойовими діями, а також вдосконалені регіональні програми управління ґрунтовими ресурсами.

Висновки

Проведене дослідження підтвердило суттєвий техногенний вплив бойових дій на хімічний склад ґрунтів Східної Харківщини. У результаті аналізу зразків ґрунту, відібраних у зонах детонацій боєприпасів, встановлено значне локальне перевищення вмісту важких металів – передусім цинку (Zn), свинцю (Pb), міді (Cu), а також хрому (Cr) і нікелю (Ni) – порівняно з природним фоновим рівнем.

Розраховані показники забруднення (CF), геоакумуляції (Igeo) та потенційного екологічного ризику (PERI) свідчать про формування осередків помірного та високого екологічного навантаження, що створює довготривалі ризики для екосистем і здоров'я населення. Особливо критичні значення виявлені у зразках із місць масованих обстрілів (зокрема, у Балаклійському та Ізюмському районах), де вміст токсичних елементів перевищує допустимі нормативи у кілька разів.

Ідентифіковано прямий зв'язок між складом сучасних боєприпасів і характером забруднення ґрунтів. Отримані результати підкреслюють необхідність впровадження інтегрованих систем "розумного" моніторингу, які поєднують аналітичну хімію, геоінформаційні технології та індексну оцінку ризику для забезпечення ефективного екологічного контролю в зонах воєнного ураження.

Отримана екогеохімічна оцінка закладає наукове підґрунтя для розроблення стратегії рекультивації та сталого відновлення постраждалих територій, а також має важливе значення для формування політики екологічної безпеки в умовах воєнних конфліктів.

Список використаних джерел

1. *Rawtani, D., Gupta, G., Khatri, N., Rao, P., & Hussain, C. (2022). Environmental damages due to war in Ukraine: A perspective. The Science of the Total Environment, 157932. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157932*
2. *Крайнюк, О., Буц, Ю., Барбашин, В., Нікітченко, О., & Сухов, В. (2024). Деградація екосистем у Харківській області під час війни: супутниковий аналіз. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (61), 329-343. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-26*
3. *Moliszewska, E., Bida, I., Matik, K., Ślusarczyk, A., Pawliczek, D., Havryliuk, O., Hovorukha, V., & Tashyrev, O. (2025). Analysis of variations in heavy metal levels and soil microorganism counts resulting from shelling incidents in Ukraine. Archives of Environmental Protection, 51(1), 83-91. https://doi.org/10.24425/aep.2025.153752*
4. *Байназаров, А., Попов, В., Вовк, У., & Пілюгін, А. (2024). Динаміка лісових пожеж на території Ізюмського району, викликаних бойовими діями. Проблеми безперервної географічної освіти і картографії, (40), 18-24. https://doi.org/10.26565/2075-1893-2024-40-02*
5. *Novakovska, I., Belousova, N., & Hunko, L. (2025). Land degradation in Ukraine as a result of military operations. Acta Scientiarum Polonorum Administratio Locorum, 4(1), 129–145. https://doi.org/10.31648/aspal.9788*
6. *Shvalya, V., Olenik, J., Vengust, D., Baranov, O., Cvelbar, U. (2024). Nanosculptured tungsten oxide: High-efficiency SERS sensor for explosives tracing Journal of Hazardous Materials, 476, 135171: 2-10 https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135171*
7. *Datsko, O., Melnyk, O., Kovalenko, I., Butenko, A., Zakharchenko, E., Ilchenko, V., Onychko, V., & Solokha, M. (2025). Estimation of the content of trace metals in Ukrainian military-affected soils. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, 53(1), 14328. https://doi.org/10.15835/nbha53114328*
8. *Denysyk, H., Kanskyi, V., Ataman, L., Volovyk, V., & Denysyk, B. (2025). Belligerent landscape boundaries of Ukraine. Journal of Geology, Geography and Geoecology, 34(1), 32-40. https://doi.org/10.15421/112504*
9. *Shaforost, Y., Pogrebniak, O., Lut, O., Litvin, V., & Shevchenko, O. (2024). Chemical military-technogenic load on the soils of military training grounds. Plant and Soil Science, 15(2), 67-79.. https://doi.org/10.31548/plant2.2024.67*
10. *Trokhymenko, G., Litvak, S., Litvak, O., Andreeva, A., Rabich, O., Chumak, L., Nalysko, M., Troshyn, M., Komarysta, B., & Sopov, D. (2023). Assessment of iron and heavy metals accumulation in the soils of the combat zone. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(10 (125), 6–16. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.289289*
11. *Bonchkovskyi, O., Ostapenko, P., Bonchkovskyi, A., & Shvaiko, V. (2025). War-induced soil disturbances in northeastern Ukraine (Kharkiv region): Physical disturbances, soil contamination and land use change. The Science of the Total Environment, 964, 178594. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178594*
12. *Moon, I., Kim, H., Jeong, S., Choi, H., Park, J., & Lee, I. (2021). Chemical properties of heavy metal-contaminated soils from a Korean military shooting range: Evaluation of Pb sources using Pb isotope ratios. Applied Sciences, 11(15), 7099. https://doi.org/10.3390/app11157099*
13. *Kornus, A., Kornus, O., Shyshchuk, V., & Potseluev, V. (2020). The regional nosogeographical analysis and factors affecting population respiratory morbidity (on example of the Sumy region, Ukraine). Journal of Geology, Geography and Geoecology, 29(1), 82-93. https://doi.org/https://doi.org/10.15421/112008*
14. *Krainiukov O., Nekos A., Buts Y., Kochanov E., Miroshnychenko I. (2020) Biomonitoring of soil quality within the limits of the oil refining enterprise XIV International Scientific Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment», November, 2020: 1–5 https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056064*

15. *Krainiuk, O., Buts, Y., Ponomarenko, R., Asotskyi, V., Darmofal, E., Kalynovskyi, A., & Maniuk, V. (2025). Environmental consequences of military operations in Ukraine on the example of soil research in the Kharkiv region. Journal of Geology, Geography and Geoecology, 34(2), 304–317.* https://doi.org/10.15421/112526
16. *Krainiuk, O. V., Buts, Y. V., Didenko, N. V., & Barbashyn, V. V. (2023). Ecological consequences of environmental pollution with heavy metals as a result of the war in Ukraine. European Association of Geoscientists & Engineers. 17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Nov 2023, 1–5.* https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520013
17. *Krainiuk, O., Buts, Y., Barbashyn, V., Nikitchenko, O., & Pakki, M. (2024). Technogenic and ecological hazards of using chemical plant protection products (on the example of copper-containing preparations). Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (60), 354-365.* https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-26
18. *Михайлюк, В. І. (2024). Вплив воєнних дій на вміст органічної речовини і елементів живлення в ґрунтах півдня України. Вісник Одеського національного університету. Географічні та геологічні науки, 29(1(44), 109–123.* https://doi.org/10.18524/2303-9914.2024.1(44).305376
19. *Babii, V., Kondratenko, O., Lytvychenko, O., Hlavachek, D., Zhdan-Pushkina, O., Stankevych, V., Ostanina, N., Brytsun, V., Rudnytska, O., Suvorova, I., & Tetenova, I. (2024). Analytical consideration of the issues of soil pollution by hazardous substances, which contained in shells and rockets and possible ways of their influence on the population. Environment & Health, 4, 45-51.* https://doi.org/10.32402/dovkil2024.04.045
20. *Козярін І.П., Хоменко І.М., Черниченко І.О., Литвиченко О.М. (2023) Особливості лабораторних досліджень стану довкілля у воєнний період, 3, 24-30. Environment & Health.* https://doi.org/10.32402/dovkil2023.03.024
21. *Solokha, M., Demyanyuk, O., Symochko, L., Mazur, S., Vynokurova, N., Sementsova, K., & Mariychuk, R. (2024). Soil degradation and contamination due to armed conflict in Ukraine. Land, 13(10), 1614.* https://doi.org/10.3390/land13101614
22. *Корсун, С., Болоховська, В., Болоховський, В., Хоменко, Т., Борко, Ю., Дем'янюк, О., & Костина, Т. (2024). Агроекологічне обґрунтування меліоративних чинників для відновлення ґрунтів, порушених воєнними діями/ Агроекологічний журнал, 22, 100-112..* https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2024.305663.
23. *Ivan, J., Šustr, M., Gregor, J., Potuzák, L., & Varecha, J. (2025). Advancing soil sampling techniques for environmental assessment of artillery impact zones. Journal of Ecological Engineering, 26(5):1-14.* https://doi.org/10.12911/22998993/196688
24. *Дмитренко, О., Дем'янюк, О., Погоріла, Л., Свидинюк, Н., Рожа, В., Кирилюк, П., & Романенко, В. (2023). Екотоксикологічна оцінка дерново-підзолистого ґрунту за впливу бойових дій. Агроекологічний журнал, 4, 89-96.* https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2023.293758.
25. *Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. Water Research, 14(8), 975–1001.* https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8
26. *Müller G. (1969). Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. GeoJournal, 2, 108–118.* https://sid.ir/paper/618491/en
27. *Zgorelec, Ž., Šprem, N., Abramović, R., Galić, M., Hrelja, I., Delač, D., Safner, T., & Kisić, I. (2025). Temporal and Spatial Changes in Soil Quality at Shooting Ranges: A Case Study in Croatia. Land, 14(1), 78.* https://doi.org/10.3390/land14010078.
28. *Mendes, G., Soares, L., Viegas, R., Chiavone-Filho, O., & Nascimento, C. (2023). Lead (Pb) in Shooting Range Soil: a Systematic Literature Review of Contaminant Behavior, Risk Assessment, and Remediation Options. Water, Air, & Soil Pollution, 235(1).* https://doi.org/10.1007/s11270-023-06783-x.
29. *Flores, F., Mena, E., Granda, S., & Duchicela, J. (2025). Microbial Community Composition of Explosive-Contaminated Soils: A Metataxonomic Analysis. Microorganisms, 13.* https://doi.org/10.3390/microorganisms13020453.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу
Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

References

1. *Rawtani, D., Gupta, G., Khatri, N., Rao, P., & Hussain, C. (2022). Environmental damages due to war in Ukraine: A perspective. The Science of the Total Environment, 157932.* https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157932
2. *Krainiuk, O., Buts, Y., Barbashyn, V., Nikitchenko, O., & Sukhov, V. (2024). Ecosystem degradation in Kharkiv region during the war: satellite analysis. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (61), 329–343.* https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-26 *[in Ukrainian]*
3. *Moliszewska, E., Bida, I., Matik, K., Ślusarczyk, A., Pawliczek, D., Havryliuk, O., Hovorukha, V., & Tashyrev, O. (2025). Analysis of variations in heavy metal levels and soil microorganism counts resulting from shelling incidents in Ukraine. Archives of Environmental Protection, 51(1), 83-91.* https://doi.org/10.24425/aep.2025.153752
4. *Bainazarov, A., Popov, V., Vovk, U., & Piliugin, A. (2024). The dynamics of forest fires caused by war in the territory of Izyum district. Problems of Continuous Geographic Education and Cartography, (40), 18-24.* https://doi.org/10.26565/2075-1893-2024-40-02 *[in Ukrainian]*
5. *Novakovska, I., Belousova, N., & Hunko, L. (2025). Land degradation in Ukraine as a result of military operations. Acta Scientiarum Polonorum Administratio Locorum, 4(1), 129–145.* https://doi.org/10.31648/aspal.9788
6. *Shvalya, V., Olenik, J., Vengust, D., Baranov, O., Cvelbar, U. (2024). Nanosculptured tungsten oxide: High-efficiency SERS sensor for explosives tracing Journal of Hazardous Materials, 476, 135171: 2-10* https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135171

7. Datsko, O., Melnyk, O., Kovalenko, I., Butenko, A., Zakharchenko, E., Ilchenko, V., Onychko, V., & Solokha, M. (2025). Estimation of the content of trace metals in Ukrainian military-affected soils. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, 53(1), 14328. https://doi.org/10.15835/nbha53114328
8. Denysyk, H., Kanskyi, V., Ataman, L., Volovyk, V., & Denysyk, B. (2025). Belligerent landscape boundaries of Ukraine. Journal of Geology, Geography and Geoecology, 34(1), 32-40. https://doi.org/10.15421/112504
9. Shaforost, Y., Pogrebniak, O., Lut, O., Litvin, V., & Shevchenko, O. (2024). Chemical military-technogenic load on the soils of military training grounds. Plant and Soil Science, 15(2), 67-79. https://doi.org/10.31548/plant2.2024.67
10. Trokhymenko, G., Litvak, S., Litvak, O., Andreeva, A., Rabich, O., Chumak, L., Nalysko, M., Troshyn, M., Komarysta, B., & Sopov, D. (2023). Assessment of iron and heavy metals accumulation in the soils of the combat zone. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(10 (125), 6–16. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.289289
11. Bonchkovskyi, O., Ostapenko, P., Bonchkovskyi, A., & Shvaiko, V. (2025). War-induced soil disturbances in north-eastern Ukraine (Kharkiv region): Physical disturbances, soil contamination and land use change. The Science of the Total Environment, 964, 178594. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178594
12. Moon, I., Kim, H., Jeong, S., Choi, H., Park, J., & Lee, I. (2021). Chemical properties of heavy metal-contaminated soils from a Korean military shooting range: Evaluation of Pb sources using Pb isotope ratios. Applied Sciences, 11(15), 7099. https://doi.org/10.3390/app11157099
13. Kornus, A., Kornus, O., Shyshchuk, V., & Potseluev, V. (2020). The regional nosogeographical analysis and factors affecting population respiratory morbidity (on example of the Sumy region, Ukraine). Journal of Geology, Geography and Geoecology, 29(1), 82-93. https://doi.org/https://doi.org/10.15421/112008
14. Krainiukov O., Nekos A., Buts Y., Kochanov E., Miroshnychenko I. (2020) Biomonitoring of soil quality within the limits of the oil refining enterprise XIV International Scientific Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment», November, 2020: 1–5 https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056064
15. Krainiuk, O., Buts, Y., Ponomarenko, R., Asotskyi, V., Darmofal, E., Kalynovskyi, A., & Maniuk, V. (2025). Environmental consequences of military operations in Ukraine on the example of soil research in the Kharkiv region. Journal of Geology, Geography and Geoecology, 34(2), 304–317. https://doi.org/10.15421/112526
16. Krainiuk, O. V., Buts, Y. V., Didenko, N. V., & Barbashyn, V. V. (2023). Ecological consequences of environmental pollution with heavy metals as a result of the war in Ukraine. European Association of Geoscientists & Engineers. 17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Nov 2023, 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520013
17. Krainiuk, O., Buts, Y., Barbashyn, V., Nikitchenko, O., & Pakki, M. (2024). Technogenic and ecological hazards of using chemical plant protection products (on the example of copper-containing preparations). Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (60), 354-365. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-26
18. Mikhaylyuk, V. (2024). Influence of military actions on the content of organic matter and nutrients in soils of southern Ukraine. Odesa National University Herald. Geography and Geology, 29(1(44)). https://doi.org/10.18524/2303-9914.2024.1(44).305376 [in Ukrainian]
19. Babii, V., Kondratenko, O., Lytvychenko, O., Hlavachek, D., Zhdan-Pushkina, O., Stankevych, V., Ostanina, N., Brytsun, V., Rudnytska, O., Suvorova, I., & Tetenova, I. (2024). Analytical consideration of the issues of soil pollution by hazardous substances, which contained in shells and rockets and possible ways of their influence on the population. Environment & Health, 4, 45-51. https://doi.org/10.32402/dovkil2024.04.045
20. Koziarin, I., Khomenko, I., Chernychenko, I., & Lytvychenko, O. (2023). Features of laboratory studies of environment state during the war period. Environment & Health, 3, 24-30. https://doi.org/10.32402/dovkil2023.03.024 [in Ukrainian]
21. Solokha, M., Demyanyuk, O., Symochko, L., Mazur, S., Vynokurova, N., Sementsova, K., & Mariychuk, R. (2024). Soil degradation and contamination due to armed conflict in Ukraine. Land, 13(10), 1614. https://doi.org/10.3390/land13101614
22. Korsun, S., Bolokhovska, V., Bolokhovskyi, V., Khomenk, T., Borko, Y., Demyanyuk, O., & Kostyna, T. (2024). Agroecological substantiation of meliorative factors for restoration of soils disturbed by military actions. Agroecological journal, 22, 100-112. https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2024.305663. [in Ukrainian]
23. Ivan, J., Šustr, M., Gregor, J., Potuzák, L., & Varecha, J. (2025). Advancing soil sampling techniques for environmental assessment of artillery impact zones. Journal of Ecological Engineering, 26(5):1-14. https://doi.org/10.12911/22998993/196688
24. Dmytrenko, O., Demyanyuk, O., Pohorila, L., Svydyniuk, N., Rozha, V., Kyryliuk, P., & Romanenko, V. (2023). Ecotoxicological assessment of soddy-podzolic soil under the influence of hostilities. Agroecological journal, 4, 89-96. https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2023.293758. [in Ukrainian]
25. Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. Water Research, 14(8), 975–1001. https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8
26. Müller G. (1969). Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. GeoJournal, 2, 108–118. https://sid.ir/paper/618491/en
27. Zgorelec, Ž., Šprem, N., Abramović, R., Galić, M., Hrelja, I., Delač, D., Safner, T., & Kisić, I. (2025). Temporal and Spatial Changes in Soil Quality at Shooting Ranges: A Case Study in Croatia. Land, 14(1), 78. https://doi.org/10.3390/land14010078.
28. Mendes, G., Soares, L., Viegas, R., Chiavone-Filho, O., & Nascimento, C. (2023). Lead (Pb) in Shooting Range Soil: a Systematic Literature Review of Contaminant Behavior, Risk Assessment, and Remediation Options. Water, Air, & Soil Pollution, 235(1). https://doi.org/10.1007/s11270-023-06783-x.

29. Flores, F., Mena, E., Granda, S., & Duchicela, J. (2025). Microbial Community Composition of Explosive-Contaminated Soils: A Metataxonomic Analysis. Microorganisms, 13. https://doi.org/10.3390/microorganisms13020453.

Ecogeochemical assessment of heavy metal contamination in the soil cover of the Izyum district under the impact of military operations

Yuriy Buts [1]
DSc (Technical), Professor,
Head of the Department of Labor and Environmental Protection,
[1] Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine;
Olena Krainiuk [2]
PhD (Technical), Associate Professor,
Head of the Department of Cybersecurity,
[2] Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine;
Valeriy Sukhov [3]
PhD (Geology), Head of the Laboratory,
Department of Fundamental and Applied Geology,
[3] V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine;
Anatoliy Lisnyak [3]
PhD (Agricultural), Associate Professor,
Department of Ecology and Environmental Management;
Lidiya Katkovnikova [1]
PhD (Technical), Associate Professor,
Department of Labor and Environmental Protection

ABSTRACT

Purpose of the study. The ongoing military conflict in eastern Ukraine has caused significant damage to the environment, especially the soil cover in regions that have been subjected to intensive shelling. The purpose of the study is to assess the impact of hostilities on the ecogeochemical composition of soils in the Kharkiv region using modern monitoring and laboratory analysis methods, as well as to determine the level of environmental risk of heavy metal contamination in areas of missile and artillery shelling.

Materials and methods of research. The study was carried out in the format of a comprehensive expedition organized within the Izyum district, in the east of the Kharkiv region - the region that suffered the greatest destruction from artillery shelling and bombing. Experimental studies were conducted in the laboratory of ecological and analytical research on the basis of the Scientific Research Institution "Ukrainian Scientific Research Institute of Ecological Problems" (UKRNDIEP) (Kharkiv). The main method for determining the concentration of BM was atomic absorption spectroscopy (AAS), which provides high sensitivity and accuracy of measurements. The analysis covered key toxic chemical elements - lead (Pb), cadmium (Cd), copper (Cu), nickel (Ni) and zinc (Zn), as well as a number of associated heavy metals (Fe, Cr, Mn), which allowed for a more significant characterization of the geochemical background. The interpretation of the results was based on modern approaches to environmental risk assessment. First of all, the contamination factor (CF) was determined, which shows how many times the BM content exceeds the natural background level. Next, the geoaccumulation index (Geoaccumulation Index, Igeo) was calculated, which made it possible to establish whether the excess concentrations are a consequence of man-made influences, in particular military actions. At the final stage, an integral Potential Ecological Risk Index (PERI) was calculated, which takes into account the toxicity of each HM and predicts the possible consequences of its accumulation for the ecosystem.

Results. This study presents the results of a comprehensive field and laboratory study of chemical contamination of soils in the eastern Kharkiv region, focusing on areas directly affected by artillery and air bombardments. Soil samples were collected from 12 explosion craters throughout the Izyum district using georeferenced sampling methods. Concentrations of heavy metals, namely zinc (Zn), lead (Pb), copper (Cu), nickel (Ni), chromium (Cr), cadmium (Cd), mercury (Hg) and others, were determined using atomic absorption spectrometry. The data show significant excesses of background levels for several toxic elements, especially Zn, Pb and Cu, with contamination closely correlated with the composition of munitions and metal debris. Pollution indicators such as the contamination coefficient (CF), geoaccumulation index (Igeo) and potential ecological risk index (PERI) indicate moderate to high ecological risks in most of the studied sites. The highest PERI values were observed in areas of concentrated bombing, which highlights the long-term ecological consequences of military operations. The obtained ecogeochemical assessment emphasizes the need for an intelligent environmental monitoring system and provides a scientific basis for soil restoration strategies in post-conflict areas.

Keywords*: ecogeochemical assessment, soil contamination, heavy metals, ecological risk, impact of military operations, Izyum region, environmental monitoring, restoration.*

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 4 August 2025
Accepted 7 November 2025

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-40
UDC 574.6:556.3

Received 13 July 2025
Accepted 14 August 2025

Ecological assessment and forecasting of surface water conditions in the Southern Bug River in the territory of Mykolaiv region

Lidiia Horoshkova [1]
DSc (Economic), Professor, Department of Environmental science,
[1] National university of «Kyiv-Mohyla academy», Kyiv, Ukraine,
e-mail: goroshkova69@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7142-4308;
Oleksandr Menshov [2]
DSc (Geology), Senior Researcher, Department of Geoinformatics,
[2] Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine,
e-mail: menshov@knu.ua, https://orcid.org/0000-0001-7280-8453;
Alla Nekos [3]
DSc (Geography), Professor, Department of Environmental Monitoring and Conservation Affairs,
[3] V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine
e-mail: nekos@karazin.ua, https://orcid.org/0000-0003-1852-0234;
Yuliia Korniichuk [2,3]
Master,
e-mail: korniychukyulia2@gmail.com, https://orcid.org/0009-0008-0742-3213,
Stanislav Horoshkov [2,3]
Bachelor,
e-mail: stas20055008@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-4310-9165;
Eduard Kochanov [4]
PhD (Military), Associate Professor, Chair of Chemistry and Chemical Warfare Agents,
Department of CBRN Defense and Environmental Safety
[4] Military institute of armored forces of National Technical University
«Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine,
e-mail: edikkochanov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-8443-4054

ABSTRACT

Introduction. The issue of water supply and water security has become more relevant in the territory of Ukraine under conditions of war. Taking into account that Ukraine has an extensive water infrastructure, which includes large multipurpose reservoirs, hydroelectric power station dams, cooling systems for nuclear power plants, and others, the impact of the war is already environmentally hazardous and catastrophic. That is why research into anthropogenic influence, including during military actions, is relevant for the Southern Bug River, which is an important strategic resource for the ecological, social, and economic development of the Mykolaiv region of Ukraine.

The purpose of article. Assessment of anthropogenic and military impact on the surface waters of the Southern Bug River within the Mykolaiv region, which are used for drinking water supply, in order to forecast the development of the ecological situation and to form measures for its improvement at the stage of post-war recovery of the country.

Research methods. Methods of comparison, computer-based statistical data processing using correlation analysis of the results, as well as modeling and forecasting using regression analysis, were applied.

Research results. The paper presents the results of studies on the impact of anthropogenic and military pressure on the ecological state of surface waters within the Mykolaiv region, namely the Southern Bug River, at 153 km, near the village of Oleksiivka (village of Pankratove), drinking water intake of the city of Yuzhnoukrainsk, Mykolaiv region (47°86′87″ N, 31°11′97″ E). A forecast of the level of anthropogenic load from key pollutants was carried out using regression equations, and projected levels of phosphate ions, ammonium ions, sulfate ions, chloride ions, BOD_5, and dissolved oxygen in the surface waters of the Southern Bug River were determined.

Conclusions. The study presents the results of a comprehensive ecological assessment of the quality of surface waters of the Southern Bug River in the city of Yuzhnoukrainsk, Mykolaiv region, over the period of 2003–2024. The dynamics of key water quality indicators were studied, in particular the content of phosphate ions, ammonium, sulfate ions, chloride ions, biochemical oxygen demand (BOD_5), and the level of dissolved oxygen. The obtained analysis results allow us to conclude that the aquatic system of the Southern Bug River in the area of Oleksiivka (Pankratove) has a stable biogenic-organic load, which intensified during 2020–2024. An increase in nitrogen, phosphates, surfactants, and herbicides indicates a systematic influence of domestic and agricultural pollution sources. The trends in COD/BOD_5, combined with a decrease in dissolved oxygen, indicate a decline in aeration potential and an increased risk of hypoxia. A forecast of the anthropogenic load level from key pollutants was carried out using regression equations, and projected levels of phosphate ions, ammonium ions, sulfate ions, chloride ions, BOD_5, and dissolved oxygen in the surface waters of the Southern Bug River were determined.

Keywords*: surface waters, ecological assessment, anthropogenic load, water pollution, correlation data analysis, regression analysis, forecasting.*

In cites: Horoshkova Lidiia, Menshov Oleksandr, Nekos Alla, Korniichuk Yuliia, Horoshkov Stanislav, Kochanov Eduard (2025). Ecological assessment and forecasting of surface water conditions in the Southern Bug River in the territory of Mykolaiv region. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 542-555. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-40

© Horoshkova Lidiia, Menshov Oleksandr, Nekos Alla, Korniichuk Yuliia, Horoshkov Stanislav, Kochanov Eduard, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Introduction. In Ukraine's water supply system, surface waters play an important role, accounting for approximately 80% of the demand. However, at the same time, the country is among those with limited reserves of freshwater. The problem of water scarcity is particularly acute in the south, especially in the Mykolaiv region. In terms of specific water reserves per area and per capita, the region is among the least provided for among all regions of the country.

The issues of water supply and water security have become more urgent in Ukraine under wartime conditions. Considering that Ukraine has an extensive water infrastructure, which includes large multipurpose reservoirs, hydroelectric power station dams, cooling systems for nuclear power plants, etc., the impact of the war is already environmentally hazardous and catastrophic. In addition, during military aggression, surface and groundwater, as well as atmospheric air, are subjected to direct military influence. This impact is noticeable for major rivers such as the Dnipro, Southern Bug, Inhul, Siverskyi Donets, and Danube, as well as for smaller rivers, natural and artificial reservoirs, and coastal areas of the Azov and Black Seas [1–20].

The results of recent studies on surface waters in different countries are presented in articles [21–23].

Therefore, the study of anthropogenic influence, including during military actions, is especially relevant for the Southern Bug River, which is a vital strategic resource for the ecological, social, and economic development of the Mykolaiv region of Ukraine.

The aim of this study. The main source of water supply for most settlements in the Mykolaiv region is surface water, particularly the Southern Bug, Syniukha, and Inhul rivers. In rural areas and district centers, however, underground aquifers are more commonly used.

The rivers within the Southern Bug basin are actively used to meet the needs of industry and the agricultural sector, and they also serve as a source for the replenishment of underground water reserves and play an important role in maintaining the natural ecosystems of the region.

Despite the fact that the ecological state of the Southern Bug basin has already been the subject of scientific research in various fields [1–16], the issues of monitoring and analyzing the quality of surface waters in this area remain extremely relevant.

Therefore, the main objective of the conducted study was to assess the anthropogenic and military impact on the surface waters of the Southern Bug River within the Mykolaiv region, which are used for the drinking water supply of the city of Yuzhnoukrainsk, in order to forecast the development of the ecological situation and to formulate measures for its improvement during the post-war recovery of the country.

Research methods. The study was conducted based on data from the Laboratory of Water and Soil Monitoring of the Regional Office of Water Resources (ROVR) in the Mykolaiv region and covered the period from 2003 to 2024 in the context of the following indicators: phosphate ions, ammonium ions, sulfate ions, chloride ions, BOD_5, and dissolved oxygen.

Methods of comparison, computer-based statistical data processing using correlation analysis of the results, as well as modeling and forecasting using regression analysis, were applied.

Analysis of recent research and publications. The basin of the Southern Bug River is considered one of the oldest drainage areas on the territory of Ukraine. Its formation is closely linked to tectonic processes that occurred within the Ukrainian Shield – one of the key structural elements of the East European Platform. The geological foundation of the basin is represented by massive formations of crystalline rocks of Archean and Proterozoic age, whose age ranges from 2.5 to 3.0 billion years. The foundation consists of granites, gneisses, quartzites, and amphibolites, which have a complex block structure with pronounced fracturing [1, 2].

In the middle section of the river – from Haivoron to Pervomaisk – ancient crystalline rocks are exposed, forming unique granite rapids. This region, known as the «Buzkyi Gard», has exceptional geomorphological and environmental significance and represents an interaction between tectonic movements and contemporary erosional-accumulative processes [3, 4].

In terms of relief, the basin is structurally complex, encompassing territories of three geographical zones: the Volhynian-Podolian and Dnipro Uplands, as well as the Black Sea Lowland. In the upper reaches of the Southern Bug, deep valleys with a dense network of gullies and ravines developed on loess soils are formed. The middle course is characterized by rocky outcrops of magmatic rocks that form canyons, waterfalls, and rapids. The lower part of the river has wide, weakly incised valleys with alluvial and deluvial deposits, where floodplains, oxbow lakes, deltas, and limans are formed [2].

Tectonic uplifts and subsidences were key factors in the development of the basin, altering the erosion base and contributing to the formation of numerous tributaries, gullies, and ravines. This led to the uneven development of the Southern Bug's valley network. In the lower course, the Pliocene and Pleistocene transgressions of the Black Sea had a significant impact, resulting in the accumulation of thick layers of marine sediments – clays, sandy loams, sands with shell fragments. These deposits are highly permeable and influence the hydrogeochemical regime [2].

The chemical properties of the water are determined by the geological foundation. The water of the Southern Bug is predominantly of hydrocarbonate-calcium composition. This is due to the dissolution of carbonate rocks and secondary salinization of alluvial layers. In the middle and lower courses, mineralization can reach 600–1000 mg/dm³, which significantly affects both aquatic biota and the suitability of water for technical use. Fracturing of the crystalline rocks ensures stable underground inflow to the river during low-water periods, supporting the base flow [6].

Paleogeographic research indicates that the geological structure of the area significantly influenced the settlement of the basin even in prehistoric times. As early as the Mesolithic, the river served as an important transport artery, source of water, and food resources for early communities. Numerous archaeological sites have been discovered near the cities of Pervomaisk, Voznesensk, and Mykolaiv, attesting to continuous human occupation of this region [2].

In recent decades, anthropogenic pressure on the Southern Bug basin has intensified, associated with the development of cities, industrial facilities, agriculture, and a decline in the effectiveness of environmental control. The main sources of pollution include industrial effluents, domestic wastewater, urban stormwater runoff, and agrochemicals – nitrates, phosphates, pesticides, and herbicides washed off from fields [7,8].

The most polluted areas are zones around Khmelnytskyi, Vinnytsia, Pervomaisk, Voznesensk, and Mykolaiv, where the river flows into the Buh Estuary. High concentrations of heavy metals (Cu, Zn, Pb, Ni, Cd), petroleum products, phenols, and surfactants are recorded in the water. This negatively affects benthic ecosystems and the overall ecological condition of the river. Thanks to geoinformation analysis, ecological risk maps have been created [9].

A separate threat is eutrophication, which arises due to excessive input of phosphorus and nitrogen, causing rapid development of blue-green algae. The most vulnerable is the middle course in the Podillia region, where more than 70% of land is used for agriculture. Eutrophication leads to oxygen depletion, reduced water transparency, and decreased biodiversity [10, 11].

An increase in the content of phosphates, nitrites, organic matter, and ammonium is observed in the water, causing the ecosystem to shift into a stable eutrophic or hypertrophic state. At the same time, the composition of the ichthyofauna changes – valuable fish species are displaced by less demanding or invasive ones. The number of mollusks and zooplankton decreases, disrupting food chains [8].

Additional harm is caused by thousands of small water bodies – over 3,500 ponds, reservoirs, and dams – that slow down the flow, reduce aeration, and contribute to the formation of anaerobic zones. Under such conditions, toxic compounds such as methane and hydrogen sulfide are formed, which further deteriorate the state of the aquatic environment.

The Southern Bug is the second-longest river located entirely within Ukraine. Its basin covers an area of over 64,000 km² and includes seven regions, with a population of about 3 million people. The total length of its tributaries exceeds 13,000 km; the largest among them are the Buzhok, Ikva, Syniukha, and Chychykliia [12].

The seasonal dynamics of water flow are clearly expressed: in spring (March–April), during snowmelt, up to 60% of the annual runoff is formed. In summer and autumn, water levels decrease due to lack of precipitation, increased evaporation, and active water abstraction. In dry years, the average discharge in the lower reaches can drop to 60–70 m³/s [13].

Over 3,000 artificial water bodies operate in the basin territory, significantly altering the natural distribution of water, affecting temperature, aeration, and self-purification processes. This disrupts fish migration, reduces the productivity of floodplain zones, and changes the hydrological regime [14].

In the Mykolaiv region, water withdrawal during the summer period reaches 8–10 million m³, while only up to 20% is returned. This causes runoff deficits, drying of small tributaries, and degradation of the coastal ecosystem [13].

Water quality remains problematic. Exceedances of ammonium nitrogen, phosphates, and BOD_5 levels are frequently recorded. In the lower course, especially near the estuary, mineralization reaches 800–1000 mg/dm³, making it difficult to use for drinking purposes [15].

Compliance with the EU Water Framework Directive is a current task. The existing monitoring system is mostly focused on chemical indicators, while bioindication is rarely applied. This hinders an adequate assessment of the state of water bodies [11].

Under conditions of climate change, prolonged drought periods, and the risk of desertification in certain regions, it is necessary to implement integrated water resource management: modernization of treatment facilities, ecological restoration of rivers, creation of buffer zones, and optimization of water abstraction regimes [15].

Research results. In order to achieve the stated objective, an analysis of the chemical composition of water was conducted at the drinking water intake site in the city of Yuzhnoukrainsk, Mykolaiv region: the Southern Bug River, 153 km mark, near the village of Oleksiivka (village of Pankratove), (47°86′87″ N, 31°11′97″ E) (Fig. 1).

The catchment basin of the Southern Bug River has a shape close to pear-shaped but with irregular contours. From a tectonic perspective, the majority of

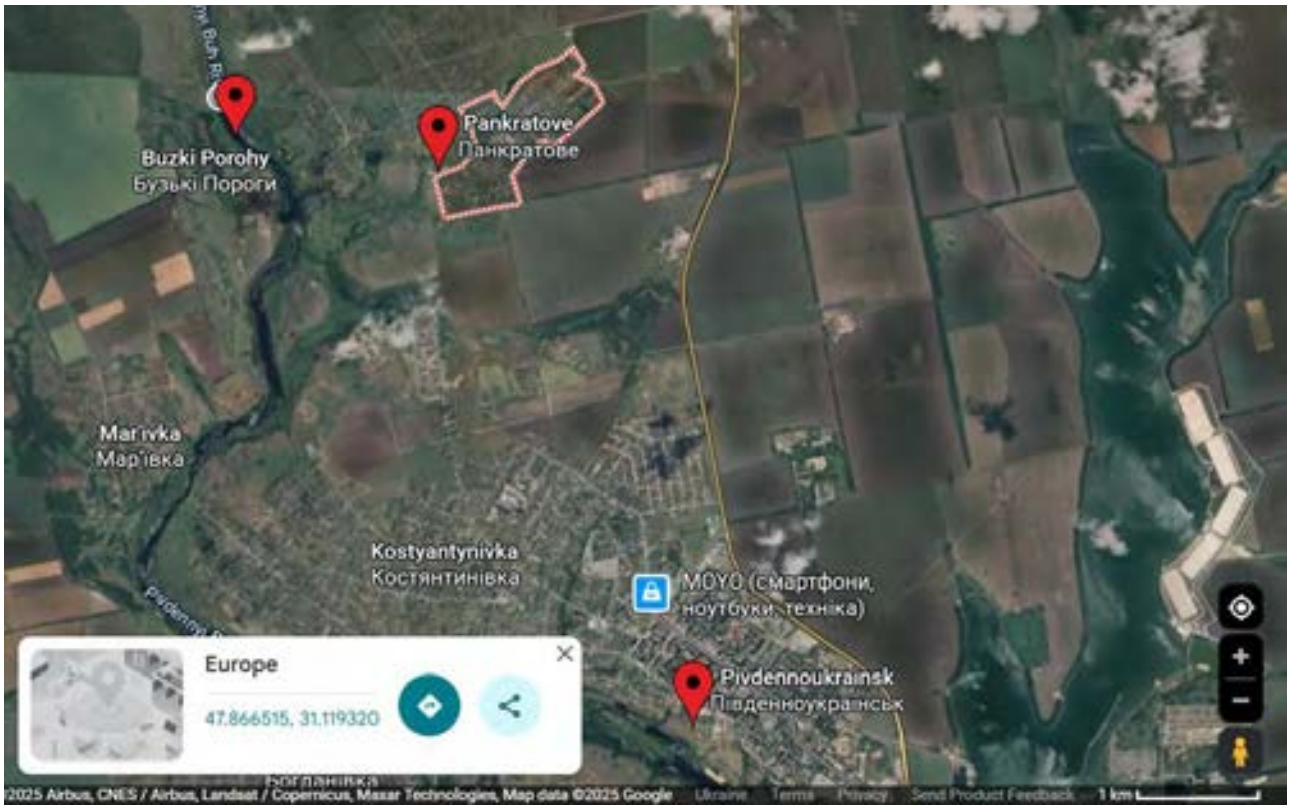


Fig. 1. Drinking water intake site (village of Pankratove) of the city of Yuzhnoukrainsk

the basin is located within the territory of the Ukrainian Crystalline Shield. Only the river's sources lie within the Volhynian-Podolian Plate, while the mouth section belongs to the Black Sea Depression. The upper and middle courses pass through the Volhynian-Podolian and Dnipro Uplands, while the lower part is situated in the Black Sea Lowland.

According to physical-geographical zoning, the basin partially covers the broad-leaved forest zone and fully includes the forest-steppe and steppe zones. Within the administrative division of the territory, the Southern Bug River and its tributaries flow through the Khmelnytskyi, Vinnytsia, Kirovohrad, Mykolaiv, Cherkasy, and partially the Odesa and Kyiv regions.

Along the river's course, three sections are distinguished, which differ significantly from one another: Upper, Middle, and Lower Pobuzhzhia. The studied section of the river belongs to the Middle Pobuzhzhia (from Vinnytsia to the village of Oleksandrivka in the Voznesensk district of the Mykolaiv region). The valley here is wider than in the previous section and ranges from 1 to 2 km. The channel is also different – unlike the previous section with small rapids, here there are many rapids, and the banks are steep, rocky, and elevated in certain segments. The flow velocity in this section is higher than in the previous one and reaches 3–4 m/s.

The basin of the Southern Bug River belongs to one of the key agro-industrial regions of Ukraine, where both agricultural and industrial activities are intensively developed. Among the sectors contributing the largest volumes of discharges into surface waters of the basin, agriculture leads (44.1%), followed by municipal utilities (31.9%) and industry (23.6%).

After treatment at municipal treatment facilities, wastewater is discharged into the Southern Bug or its first- and second-order tributaries. However, most treatment systems are worn out, and the volumes of wastewater often exceed the design capacities, leading to the discharge of insufficiently treated wastewater into water bodies.

The majority of the territory is under significant agricultural influence: agricultural lands occupy about 81% of the total basin area, and in certain subcatchments this figure ranges from 74% to 90%.

Within the Mykolaiv region, the main sources of pollution are: MKP «Mykolaivvodokanal» (Mykolaiv city), KP «Olshanske» (urban-type settlement of Olshanske), KP «Pervomaisk City Water Utility» (Pervomaisk city), KP «Prybuzke» (Nova Odesa city), «City Water Utility» (Bashtanka city), as well as the South Ukraine Nuclear Power Plant. It is worth noting that MKP «Mykolaivvodokanal» discharges already treated wastewater directly into the Southern Bug Estuary.

Thus, the main types of economic activity that create anthropogenic pressure on the water resources of the Southern Bug River basin include the housing and utilities sector, industrial production, agriculture along with fisheries, hydropower, and flood control measures.

The natural conditions of the Southern Bug River basin, along with the impact of economic activity, form specific features of its hydrochemical regime. The river is characterized by increased water mineralization, which intensifies closer to the mouth – this is explained by the geological characteristics of the territory. At the same time, the waters of the Southern Bug are saturated with dissolved oxygen, which can be attributed to the presence of rapids where active mixing of water masses occurs.

Our general assessment of the pollution level shows that throughout the entire observation period there is high variability in total nitrogen, ammonium (NH_4^+), nitrite (NO_2^-), and nitrate (NO_3^-) ions. The highest concentrations were recorded in 2005–2008, 2013, 2020, and after 2022, which indicates regular inflows of anthropogenic organic matter. Probable sources include sewage discharges, fertilizer leaching from agricultural lands, and accidental pollution.

The content of phosphate ions (PO_4^{3-}) remained stable during 2003–2019, but since 2020 a gradual increase has been observed, which may be associated with the use of phosphate-containing detergents or mineral fertilizers.

Chemical oxygen demand (COD) and biochemical oxygen demand over 5 days (BOD_5) show similar trends with multiple peaks in 2007, 2010, 2015, and 2023. This indicates regular periods of organic matter inflow into the river. Such peaks coincide with decreases in dissolved oxygen levels, which is a sign of reduced self-purification capacity of the water body.

Permanganate oxidizability, as a general indicator of the presence of organic substances, also shows periodic increases, especially in 2020–2024, indicating a persistent organic load.

Dissolved oxygen is generally maintained at the level of 6–9 mgO_2/dm^3, which is acceptable for most aquatic ecosystems. However, in certain periods (2016, 2020, 2023), a decline in concentration is observed, associated with increased organic load or changes in the hydrodynamic regime. Such oxygen deficits pose risks to aquatic fauna and the microbiocenosis.

The content of sulfate ions (SO_4^{2-}) depends on seasonality and shows interannual fluctuations with a tendency to increase after 2018. Peaks in 2020 and 2023 are the result of erosion processes, leaching of agricultural lands, or the use of sulfur-containing fertilizers.

The content of chloride ions (Cl^-) increases steadily throughout the entire period. A particularly sharp rise is recorded after 2020, indicating reduced water flow, prolonged evaporation, and the impact of sewage discharges.

Synthetic surfactants are generally at low levels; however, since 2022 a gradual increase has been observed. Atrazine and simazine, as herbicides of agricultural origin, are present in the water at a consistently low level. Their presence indicates chronic influence of the agricultural sector on water quality.

Suspended solids show uneven dynamics with periodic increases, particularly in 2013–2015, 2020, and 2024.

Phytoplankton is recorded in moderate concentrations, indicating relative stability of the trophic status of the water body; however, its increase after 2022 signals the development of eutrophication.

The aquatic system of the Southern Bug River in the area of the village of Oleksiivka (village of Pankratove) demonstrates a stable biogenic-organic load, intensified during 2020–2024. The increase in nitrogen, phosphate, surfactants, and herbicides content indicates systematic influence of domestic and agricultural pollution sources. The COD/BOD_5 trends, combined with a decline in dissolved oxygen, point to a reduction in aeration potential and a risk of hypoxia.

We will now conduct a more detailed analysis in the context of the following indicators: phosphate ions, ammonium ions, sulfate ions, chloride ions, BOD_5, and dissolved oxygen.

Figure 2 shows the results of the analysis of the dynamics of changes in the content of ammonium (NH_4^+) and phosphate (PO_4^{3-}) ions in the water during the period from 2003 to 2024.

The data indicate significant interannual variability, especially during the period from 2003 to 2012, when frequent peak discharges of both indicators were observed. This is likely related to irregular discharges of untreated or insufficiently treated wastewater, particularly from domestic and agricultural sources. In the period from 2013 to 2019, a certain stabilization of ammonium concentrations is observed; however, periodic spikes indicate recurring episodes of anthropogenic impact. The content of phosphate ions during this period is variable, with some anomalous increases (for example, in 2016 and 2019).

After 2020, a general decrease in the content of phosphates and ammonium in the Southern Bug River is noted, which potentially indicates a reduction in pollution sources or improvements in water treatment systems. At the same time, in 2023–2024, a sharp increase in phosphates and a decrease in ammonium levels are observed.

These trends can be explained as follows. First, there was a significant reduction in the amount of mineral fertilizers applied by agricultural producers in the Mykolaiv region. Thus, while 194 kg of mineral fertilizers (in active substance) per hectare were applied for the 2021 crop, this figure decreased to 138 kg/ha in 2022, and in the following years, 2023–2024, it amounted to 82 kg/ha and 98 kg/ha, respect-

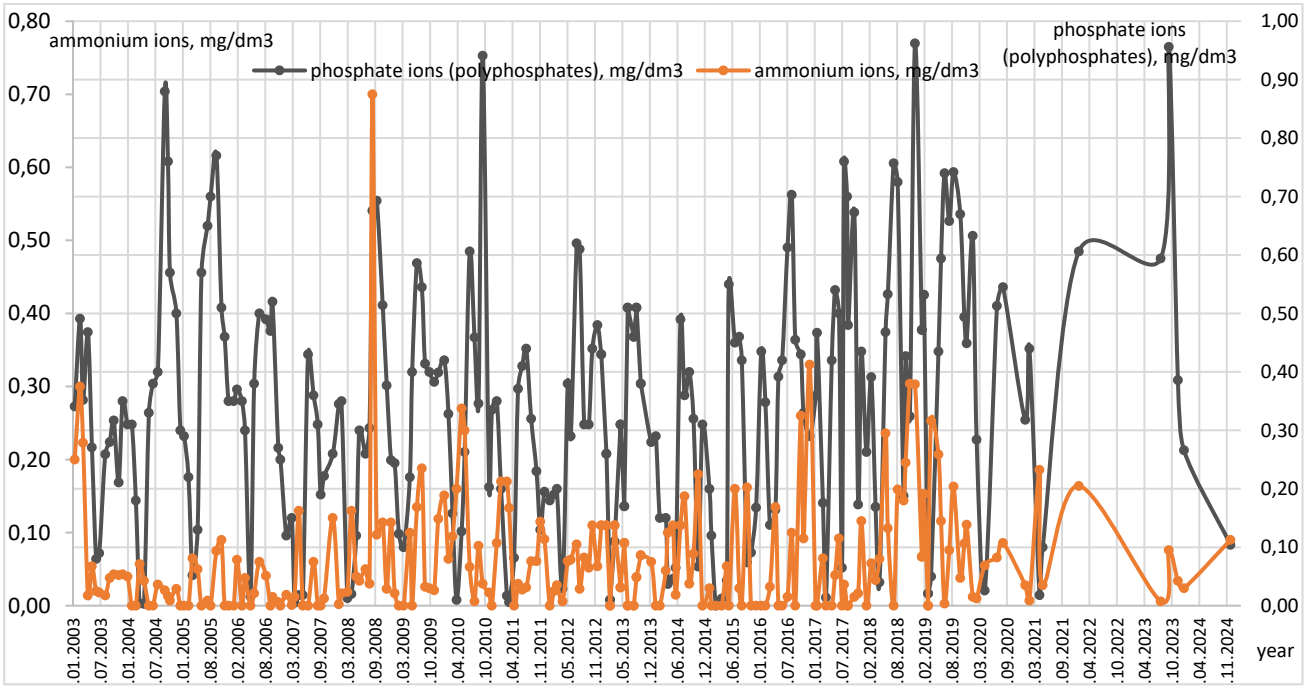


Fig. 2. Dynamics of ammonium and phosphate ion concentrations in the water of the Southern Bug River (village of Oleksiivka, drinking water intake of the city of Yuzhnoukrainsk) in 2003–2024.

ively. This is due to the fact that with the onset of the war, the ability of farmers to use mineral fertilizers changed. Ukraine ceased supplies of fertilizers such as urea, UAN (urea-ammonium nitrate), ammonium sulfate, NPK fertilizers, and potassium chloride from Belarus. As a result of rising European prices for these fertilizers, their import into Ukraine became more difficult for agricultural producers. Due to the shutdown of major nitrogen fertilizer producers in Ukraine since the beginning of the war, prices for them increased, which reduced their use by agricultural producers and, consequently, led to a decrease in the content of ammonium ions in the Southern Bug River. Based on the obtained data, it can be concluded that the underuse of nitrogen fertilizers was compensated by the use of phosphate fertilizers, which led to an increase in the amount of phosphate ions in the water of the Southern Bug.

Secondly, unfortunately, domestic wastewater remains, which contains residues of detergents and, accordingly, pollutes surface waters with phosphates.

The inverse trends between NH_4^+ and PO_4^{3-} in certain years indicate competition for biogenic uptake (for example, during algal blooms); oxygen degradation, during which phosphates settle into bottom sediments; or differences in the sources of input (organic wastewater – ammonium, detergents – phosphates).

Figure 3 shows the results of the analysis of the dynamics of sulfate (SO_4^{2-}) and chloride (Cl^-) ion concentrations, as indicators of mineralization and hydrochemical stability of river waters.

During the period from 2003 to 2020, the concentrations of both ions fluctuated within a wide range (chlorides: 30–70 mg/dm³, sulfates: 80–120 mg/dm³), reflecting both natural seasonal variations and the influence of anthropogenic sources – particularly domestic and industrial wastewater.

After 2020, a clear divergence in the behavior of the indicators is observed: the chloride level stabilizes at a lower level, while the concentration of sulfates rises sharply and remains elevated in 2022–2024. This indicates an increased load from sources related to detergents, agriculture, or the oxidation of sulfur-containing organic residues under conditions of reduced oxygen availability.

The increase in sulfates without a corresponding rise in chlorides indicates the activation of biogeochemical processes in the aquatic environment, particularly sulfate reduction and the influx of technogenic sulfate sources. Such dynamics are a sign of ecological imbalance.

Figure 4 presents the results of the analysis of the relationship between the level of dissolved oxygen (DO) and biochemical oxygen demand over five days (BOD_5) during the period from 2003 to 2024, which are key indicators of the degree of organic pollution and the self-purification capacity of the water body.

Throughout the entire observation period, a typical inverse relationship between these two parameters is observed. In years with elevated BOD_5 values (for example, 2006, 2009, 2015, 2020–2021), the level of dissolved oxygen decreases. This indicates intensive oxygen consumption by microorganisms decomposing organic pollutants.

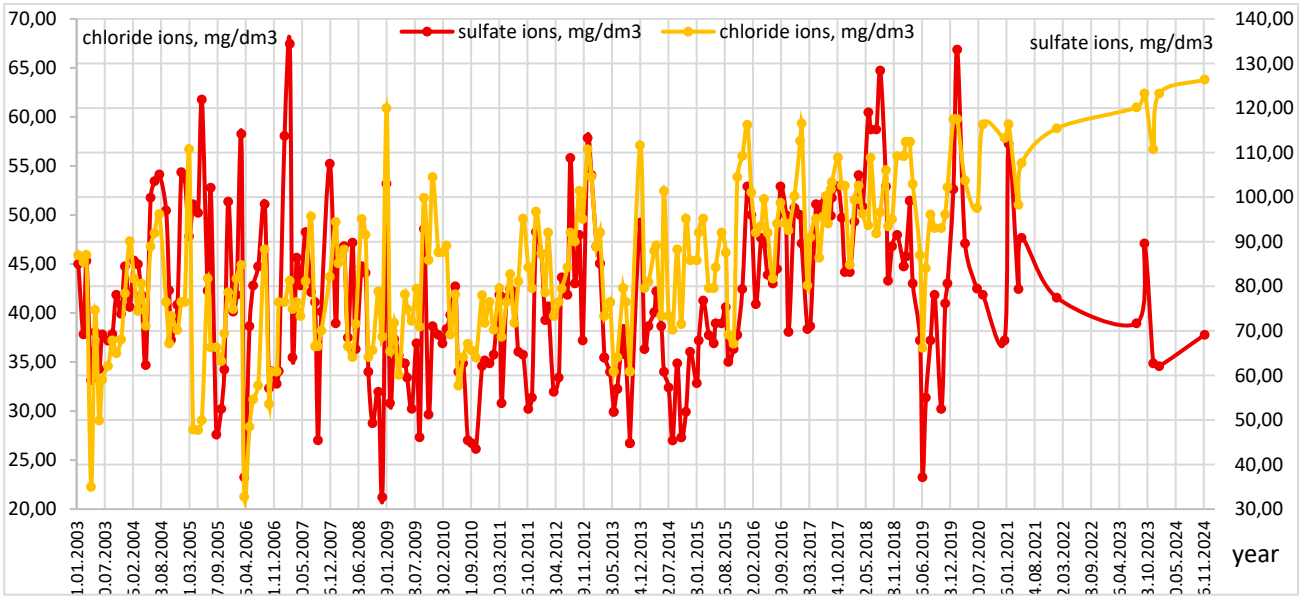


Fig. 3. Dynamics of changes in sulfate and chloride ion concentrations in the water of the Southern Bug River (village of Oleksiivka, drinking water intake of the city of Yuzhnoukrainsk) in 2003–2024

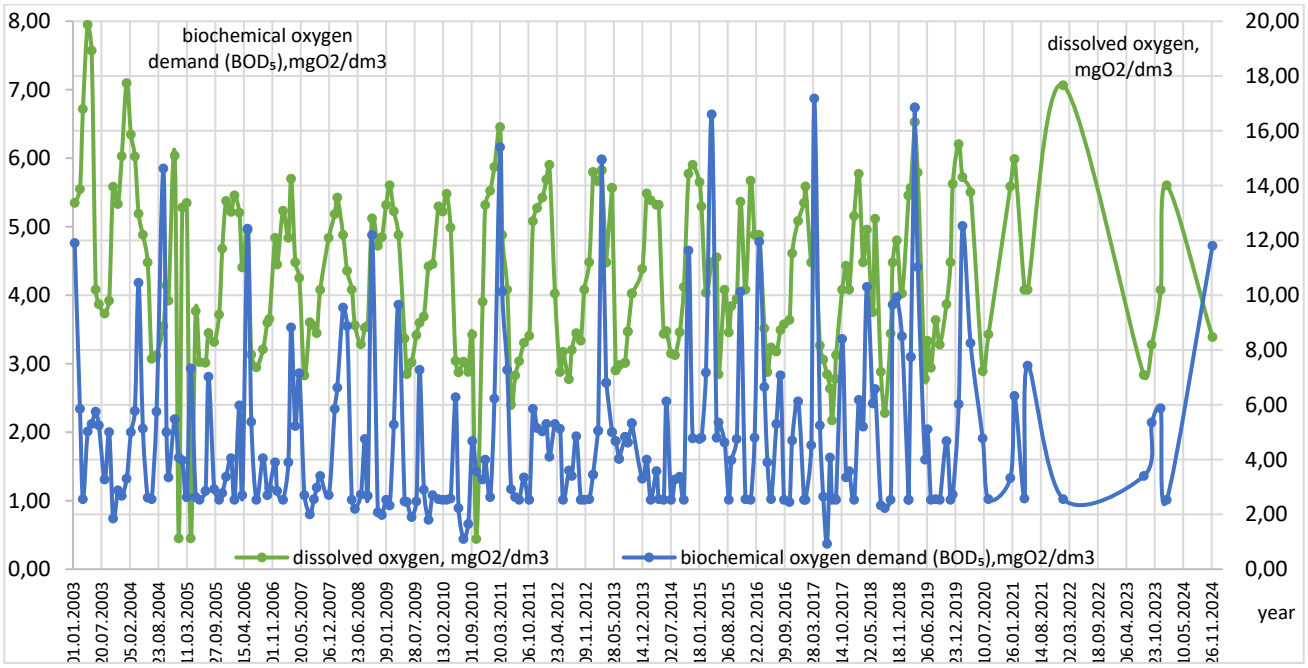


Fig. 4. Dynamics of dissolved oxygen concentration and biochemical oxygen demand (BOD_5) in the water of the Southern Bug River (village of Oleksiivka, drinking water intake of the city of Yuzhnoukrainsk) in 2003–2024

At the same time, during periods with relatively low BOD_5 levels (2007, 2012, 2018), an increase in DO is observed, which indicates a reduction in organic load and improved aeration conditions.

Starting from 2020, an increase in the amplitude of fluctuations in both indicators is observed, which is associated with the instability of sources of organic pollution or changes in the hydrological regime of the river. Particularly notable is the drop in dissolved oxygen concentration in August 2023, which can be explained by a certain increase in BOD_5; thus, oxygen was consumed for the oxidation of organic substances in the water. In addition, the maximum permissible concentration (MPC) for BOD_5 was exceeded in December 2024 for the first time since 2020, under conditions of low dissolved oxygen levels. This indicates pollution of surface waters and oxygen consumption for the oxidation of organic contaminants.

Overall, the data confirm the sensitivity of the river ecosystem to organic loading. BOD_5 values above 3–4 mgO_2/dm^3, in combination with reduced DO, indicate an increased risk of aquatic environment degradation.

Figure 5 presents the results of statistical analysis of the dynamics of changes in the values of the studied indicators during the period from 2003 to 2024.

For visualization, «box-and-whisker» diagrams were used to show the distribution of surface water indicators of the Southern Bug River, including minimum and maximum values, first and third quartiles, as well as the median.

As we can see, the interquartile range, which indicates dispersion, for dissolved oxygen, phosphate, sulfate, and chloride ions demonstrates a moderate level of variation. Exceptions are ammonium ions and BOD_5, for which the spread is more significant.

Table 1 presents a comparison of the average values of the studied indicators with their median values.

As observed, the median and arithmetic mean values are practically the same for most indicators, except for ammonium ions and BOD_5. This indicates the presence of anomalous values (either low or high) during the period 2004–2024. Other indicators exhibited more stable trends over the years. The median, as is well known, is a more robust measure of central tendency, less sensitive to such outliers, and better reflects the typical value in a dataset. However, in this case, both the arithmetic mean and the median values do not exceed the maximum permissible concentrations (MPC). This gives reason to conclude that, despite the presence of occasional instances of increased surface water pollution in the Southern Bug River, the river demonstrates a capacity for self-purification.

In order to determine the relationship between different pollutants in the surface waters of the Southern Bug River, correlation matrices were constructed for two periods – from 2003 to 2024 and from 2016 to 2024. It was established that for the first period, there is a positive correlation between sulfate and chloride ions (0.48841), and a negative correlation between phosphate ions and BOD_5 (–0.33761).

Figure 6 presents the results of the analysis of averaged indicators (arithmetic mean) of changes in the concentrations of ammonium ions (NH_4^+, orange line) and phosphate ions (PO_4^{3-}, dark gray line) in

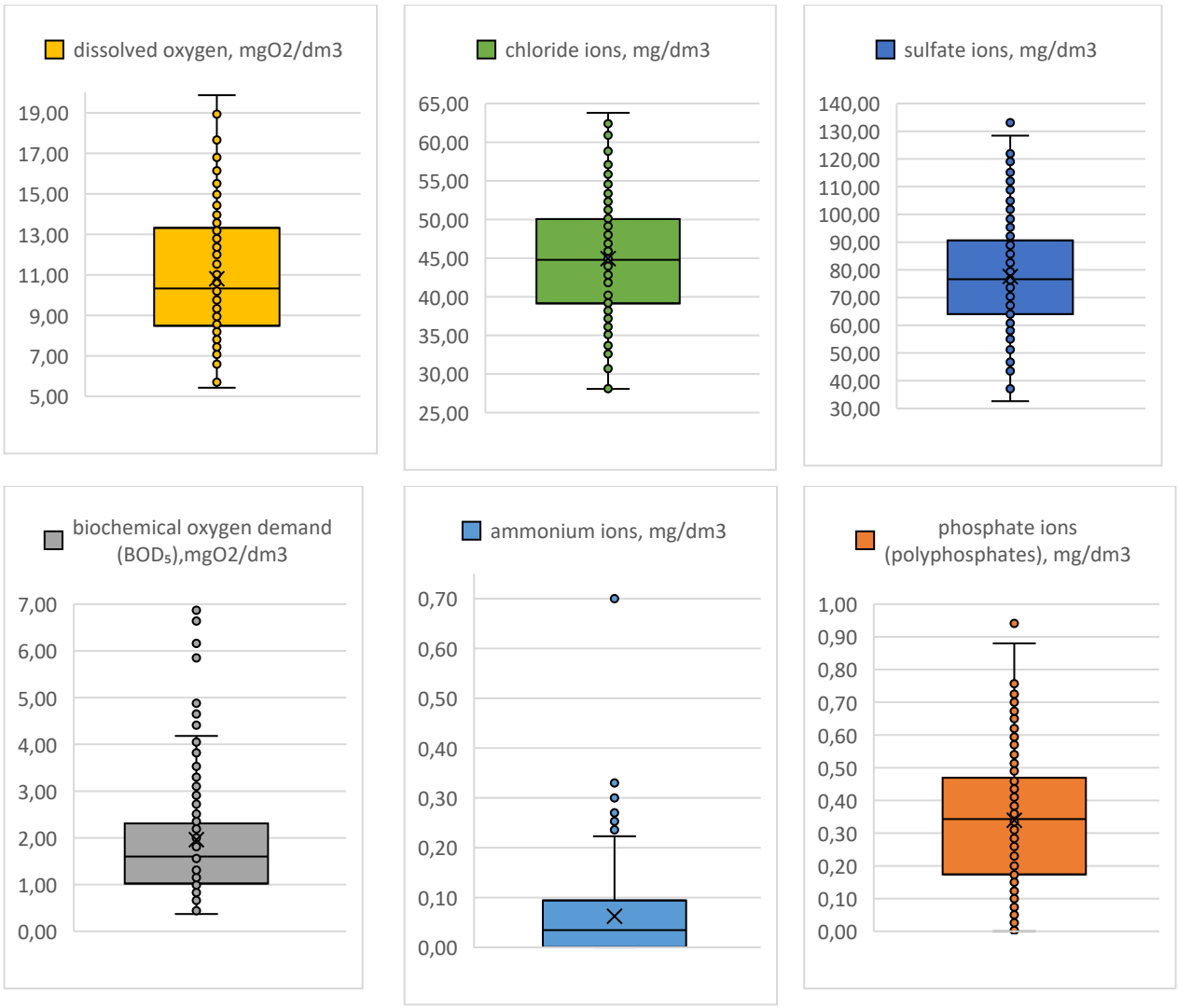


Fig. 5. Statistical analysis of pollution dynamics indicators of the Southern Bug River

Table 1

Comparative analysis of arithmetic mean and median values of pollutant concentration indicators

	ammonium ions, mg/dm^3	phosphate ions, mg/dm^3	biochemical oxygen demand (BOD_5), mgO_2/dm^3	dissolved oxygen, mgO_2/dm^3	sulfate ions, mg/dm^3	chloride ions, mg/dm^3
MPC (Maximum Permissible Concentration)	0,5	3,5	3,00	4,00	100,00	350,00
Arithmetic mean value	0,0625	0,3395	1,9618	10,8035	77,5747	44,9376
Median value	0,0350	0,3410	1,6000	10,3600	76,8000	44,9000

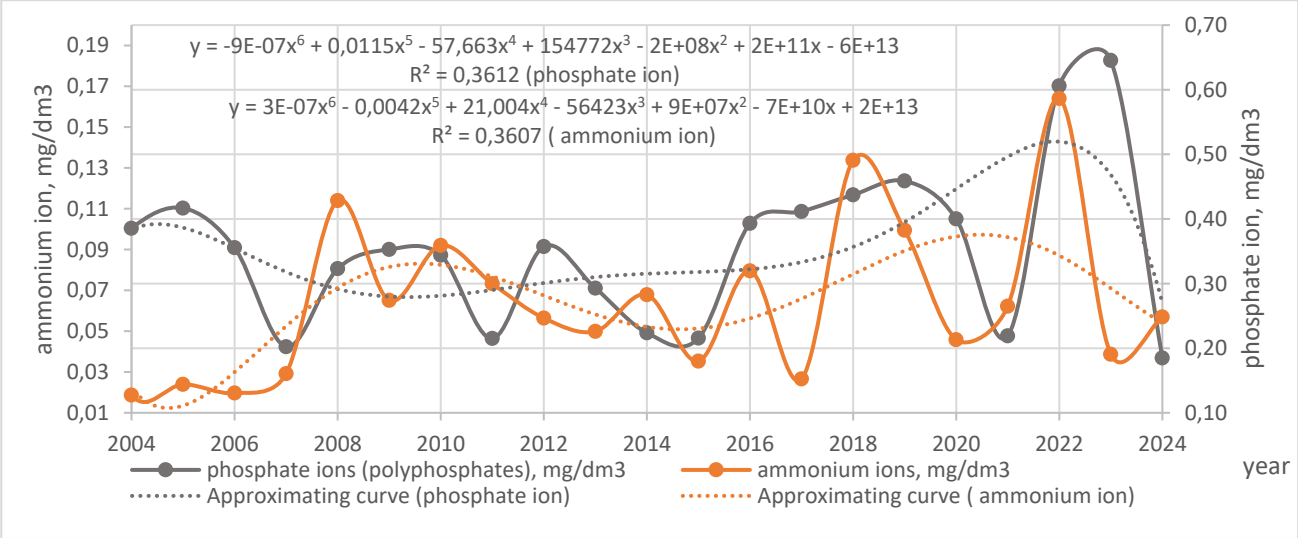


Fig. 6. Dynamics of changes in phosphate and ammonium ion concentrations in the water of the Southern Bug River (village of Oleksiivka, drinking water intake of the city of Yuzhnoukrainsk) in 2004–2024 with approximation curves

the water during 2003–2024.

Approximating curves have been constructed to illustrate the general long-term trends in the concentration changes of two key biogenic components – mineral nitrogen and phosphorus. As previously shown, the arithmetic mean values are sufficiently close to the median values, and therefore the use of arithmetic means is entirely acceptable.

The approximation equation for ammonium ions (NH_4^+):

$$y = -3\times10^{-6}x^6 + 0.0255x^5 - 102.76x^4 + 2.0681\times10^5x^3 - 2\times10^8x^2 + 8\times10^{10},$$

with a coefficient of determination $R^2 = 0.3607$.

Maximum concentrations of ammonium were observed in 2008, 2018, and 2022, which is associated with the inflow of domestic wastewater and a decrease in nitrification efficiency due to reduced dissolved oxygen.

The approximation equation for phosphate ions (PO_4^{3-}):

$$y = -9\times10^{-7}x^6 + 0.0115x^5 - 57.663x^4 + 1.54772\times10^3x^3 - 2\times10^8x^2 + 2\times10^{11}x - 6\times10^{13},$$

with a coefficient of determination $R^2 = 0.3612$.

Phosphate ions show clear maxima in 2005, 2013, 2019, and 2023, with minima in 2010, 2016, and 2024. This indicates an uneven inflow of phosphorus compounds, originating from detergents or agricultural sources.

The overall dynamics indicate that during the studied period there was a periodic increase in the concentrations of both components, with certain asynchronous fluctuations. This confirms the complexity of the biogeochemical interaction between nitrogen and phosphate compounds in the aquatic environment, driven both by anthropogenic influence and internal transformation processes (biogenic uptake, desorption, anoxic release).

Figure 7 presents the results of the analysis of the averaged concentrations of sulfate (SO_4^{2-}) and chloride ions (Cl^-) in the surface waters of the Southern Bug River during 2003–2024. These values represent the arithmetic means of the respective ion concentrations. Such averaging levels out seasonal variability but allows for modeling with the construction of polynomial approximation curves, making it possible to identify general trends in mineralization over the period 2004–2024.

Approximation equation for sulfate ions (mg/dm^3):

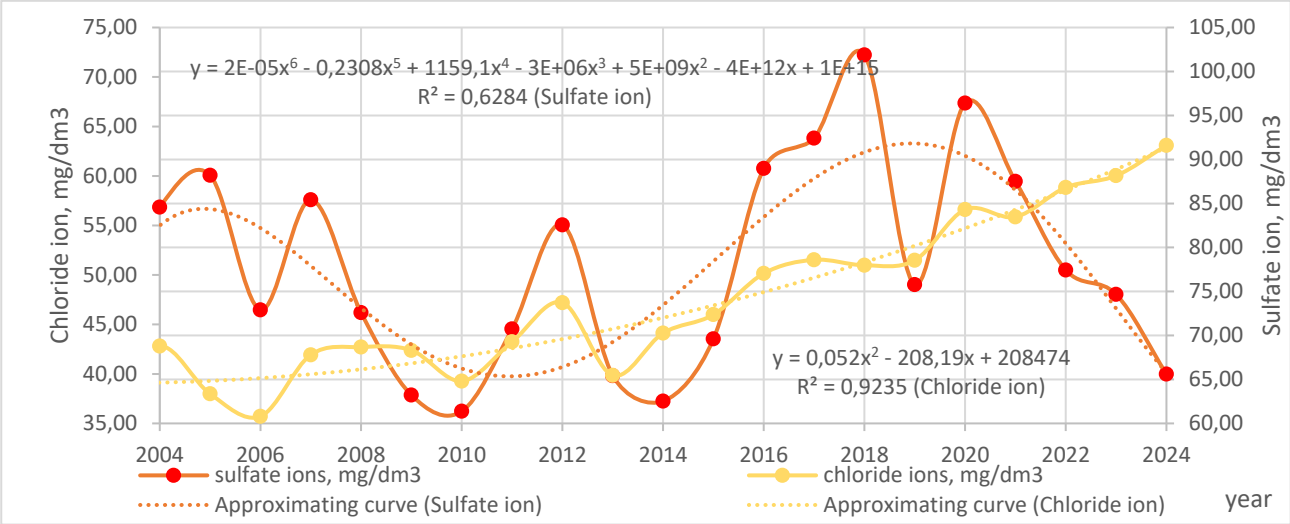


Fig. 7. Dynamics of changes in sulfate and chloride ion concentrations in the water of the Southern Bug River (village of Oleksiivka, drinking water intake of the city of Yuzhnoukrainsk) in 2004–2024 with approximation curves

$y = 2\times10^{-5}x^6 - 0.2308x^5 + 1159.1x^4 - 3\times10^6x^3 + 5\times10^9x^2 - 4\times10^{12}x + 1\times10^{15}$, coefficient of determination $R^2 = 0.6284$**,** which indicates acceptable model reliability.

Approximation equation for chloride ions (mg/dm³):

$y = 0.052x^2 - 208.19x + 208474$, coefficient of determination $R^2 = 0.9235$, which indicates a high degree of model fit to the actual data.

In the early years of the analyzed period (2004–2010), the concentrations of both ions fluctuated with periodic decreases, which is associated with changes in the water balance or limitations in the sources of mineral pollution. Starting from 2012, chloride concentrations show a clear and steady increase, which is related to the influence of agricultural activities or the accumulation of salts in the water body due to reduced flow.

The reasons for such an increase include the presence of domestic wastewater, as a significant amount of insufficiently treated effluents enters the surface waters of the Southern Bug River. In addition, additional anthropogenic pressure may result from fertilizer runoff – specifically potassium chloride – from agricultural lands. Furthermore, a common issue for the Southern Bug, as well as many rivers in southern Ukraine, is the gradual reduction in water flow.

Sulfates, in turn, reached peak values in 2018–2020, after which their levels began to decline. This indicates both changes in pollution sources and chemical reactions in the aquatic environment associated with shifts in pH or the formation of sediment deposits.

The overall trend confirms a tendency toward increasing water mineralization, especially due to the growth in chloride levels, which is an indicator of salt accumulation in the system and potential deterioration of water quality.

Figure 8 presents the results of the analysis of averaged values of biochemical oxygen demand over 5 days (BOD_5, blue line) and dissolved oxygen concentration (green line) in the water during the period 2004–2024, along with the corresponding approximation curves that illustrate the general trends in the changes of these indicators.

Approximation equation for BOD_5 (mgO_2/dm^3):

$y = 6\times10^{-7}x^6 - 0.0077x^5 + 39.553x^4 - 1.0791\times10^5x^3 + 2\times10^8x^2 - 1\times10^{11}x + 5\times10^{13}$,

coefficient of determination $R^2 = 0.3889$, which indicates low reliability of the model describing the trend of this indicator.

Approximation equation for dissolved oxygen (mgO_2/dm^3):

$y = 5\times10^{-6}x^6 - 0.0568x^5 + 285.69x^4 - 7.66601\times10^3x^3 + 1\times10^9x^2 - 9\times10^{11}x + 3\times10^{14}$,

coefficient of determination $R^2 = 0.4155$, which indicates considerable variability in dissolved oxygen concentrations during the period.

During 2004–2012, BOD_5 values remained relatively stable, but starting from 2015 a trend of gradual increase is observed, reaching peak values in 2020–2024. This indicates growing organic load associated with intensified anthropogenic impact.

High concentrations of dissolved oxygen were recorded in 2004, 2010, 2018, and 2022, while significant declines indicating hypoxic conditions were observed in 2006, 2009, 2015, and 2023.

Thus, during the period from 2003 to 2021, there were years when a classical inverse relationship between BOD_5 and dissolved oxygen was observed, i.e., increased organic load (higher BOD_5)

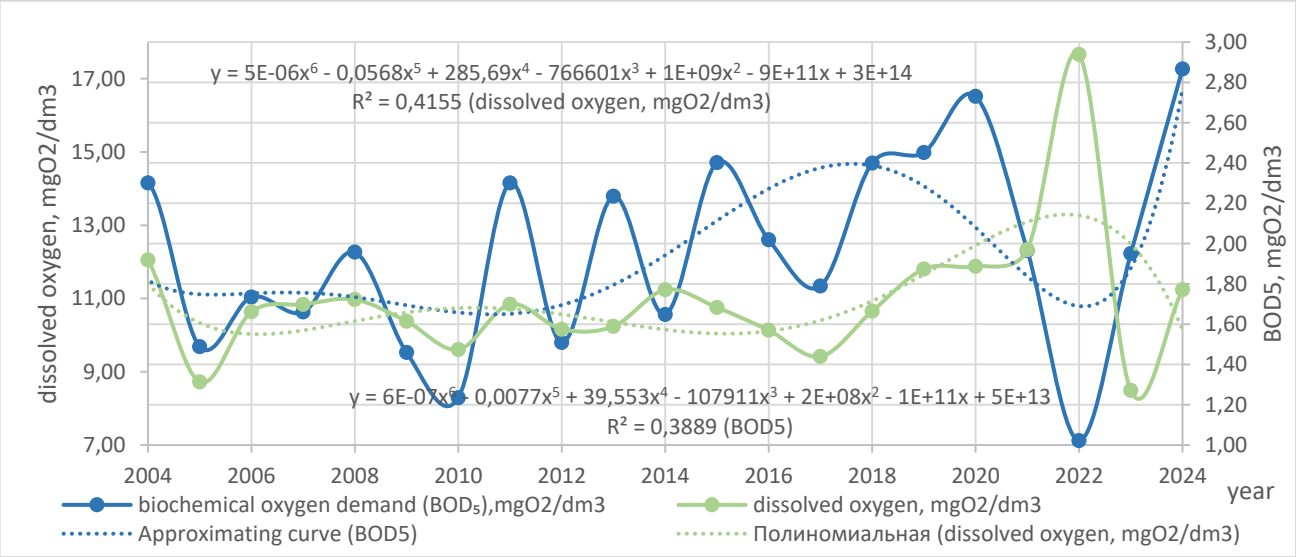


Fig. 8. Dynamics of changes in biochemical oxygen demand (BOD_5) and dissolved oxygen concentration in the water of the Southern Bug River (village of Oleksiivka, drinking water intake of the city of Yuzhnoukrainsk) in 2004–2024 with approximation curves

was accompanied by a decrease in oxygen content. However, there were also periods when this relationship was disrupted.

During 2022–2024, a classical pattern re-emerged – an increase in dissolved oxygen was accompanied by a decrease in BOD_5. A decrease in BOD_5 means there are fewer organic substances in the water that require decomposition, and therefore less oxygen is consumed in the process. Taking into account that in these very years the levels of sulfate and ammonium ions decreased, there is reason to believe that these ions represent the main anthropogenic load on the surface waters of the Southern Bug River.

The gradual increase in chloride content and the periodic (point-source) increases in phosphate ions had a negative impact, but it was not catastrophic in nature.

Conclusions. The obtained analysis results allow us to conclude that the aquatic system of the Southern Bug River in the area of the village of Oleksiivka (village of Pankratove) – the drinking water intake for the city of Yuzhnoukrainsk – experiences a stable biogenic-organic load, which intensified in 2020–2024. Increases in nitrogen, phosphates, surfactants, and herbicides indicate systematic influence from domestic and agricultural pollution sources. Trends in COD/BOD_5 combined with decreased dissolved oxygen suggest a decline in aeration potential and an increased risk of hypoxia.

It was found that during 2003–2012, irregular discharges of untreated or insufficiently treated wastewater were observed. In 2013–2019, some stabilization in ammonium concentrations was noted, although periodic spikes indicated recurring episodes of anthropogenic impact. During this period, phosphate ion levels fluctuated with individual anomalous increases. After 2020, a general decline in phosphate and ammonium content in the Southern Bug River was recorded, potentially indicating a reduction in pollution sources or improvements in water treatment systems. At the same time, in 2023–2024, a sharp increase in phosphates and a decrease in ammonium levels were observed, associated with a shift in the types of fertilizers used in agriculture – from ammonium-based to phosphate-based.

An analysis of the dynamics of sulfate (SO_4^{2-}) and chloride (Cl^-) ion concentrations – as indicators of mineralization and hydrochemical stability of river waters – showed that during 2003–2020, the concentrations of both ions varied within a wide range. This was associated both with natural seasonal changes and the influence of anthropogenic sources – in particular, domestic and industrial wastewater. After 2020, the main pollution sources were linked to detergents, agriculture, or the oxidation of sulfur-containing organic residues under low-oxygen conditions.

The results of the analysis of the relationship between dissolved oxygen (DO) levels and biochemical oxygen demand over five days (BOD_5) during 2003–2024 showed an inverse interaction between these two parameters. Since 2020, the amplitude of fluctuations in both indicators has increased, which is associated with the instability of organic pollution sources or changes in the river's hydrological regime.

A statistical analysis of the dynamics of changes in the studied indicators during 2003–2024 was conducted and visualized using box-and-whisker plots.

To identify relationships between different pollutants in the surface waters of the Southern Bug River, correlation matrices were built for two periods – 2003 to 2024 and 2016 to 2024. It was found that in the first period there was a positive correlation

between sulfate and chloride ions, and a negative one between phosphate ions and BOD_5. In the second period, a positive correlation was observed between chloride ions and dissolved oxygen levels, and a negative one between phosphate ions and BOD_5.

Forecasting of anthropogenic load levels based on key pollutants was conducted using regression equations, and projected levels of phosphate ions, ammonium ions, sulfate ions, chloride ions, BOD_5, and dissolved oxygen in the surface waters of the Southern Bug River were determined.

Acknowledgments. The research was carried out under project 0124U004208 «Ecological and economic optimization of logistics infrastructure during war and post-war reconstruction of Ukraine», implemented as part of the scientific work program, scientific-technical and infrastructure projects funded from special fund resources obtained from the European Union's external assistance instrument for fulfilling Ukraine's obligations in the European Union Framework Programme for Research and Innovation «Horizon 2020».

Bibliography

1. *Афанасьєв, С. О. (ред.). (2012). Оцінка екологічного стану річки Південний Буг у відповідності до вимог Водної Рамкової Директиви ЄС. Київ. 28 с. https://www.researchgate.net/publication/275332910_Ocinka_ekologicnogo_stanu_ricki_Pivdennij_Bug_u_vidpovidnosti_do_vimog_Vodnoi_amkovoi_Direktivi_R_ES*
2. *Лаврик О.Д. (2010). Річкові ландшафти Південного Бугу як перспективна основа формування культурних ландшафтів. Наукові записки Вінницького державного педагогічного університету імені Михайла Коцюбинського. Серія: Географія, 21, 156–166. https://dspace.udpu.edu.ua/xmlui/bitstream/handle/6789/184/23_Lavryk_nzvpu_21_156-166.pdf?sequence=1&isAllowed=y*
3. *План управління ризиками затоплення для окремих територій у межах району басейну річки Південний Буг на 2023–2030 роки. (2022). Кабінет Міністрів України. https://ips.ligazakon.net/document/KR2208953*
4. *Курепін В.М. (2020). Відновлення і збереження водних ресурсів Південного Бугу. У Глобальні ризики у формуванні міжнародної екологічної безпеки (с. 18–22). Миколаїв: МНАУ.*
5. *Хільчевський В.К. [та ін.]; ред. В.К. Хільчевський. (2009). Водні ресурси та якість річкових вод басейну Південного Бугу. Київ: Ніка-Центр.*
6. *Магась Н.І. (2024). Оцінка сучасного стану та рівня екологічної безпеки річкових вод в басейні Південного Бугу на території Миколаївської області. У Екологія. Довкілля. Енергозбереження. 2024: Колективна монографія (с. 17–30). https://nupp.edu.ua/uploads/files/0/events/conf/2024/v-edo/monog.pdf*
7. *Смирнов В.М., Смирнова С.М. (2014). Просторова інтерполяція забруднення донних відкладень Бузького лиману важкими металами. Науковий вісник Миколаївського державного університету імені В.О. Сухомлинського. Серія: Біологічні науки, 13(6.3), 97–102. http://mdu.edu.ua/wp-content/uploads/files/24_11.pdf*
8. *Тимончук К.А., Вовк В.М. (2020). Динаміка забруднення річкових вод середньої та нижньої частини басейну Південного Бугу. У Стратегії інноваційного розвитку природничих дисциплін: Матеріали міжнар. наук.-практ. конф. (с. 70–72). Кропивницький.*
9. *Сапко О.Ю., Кур'янова С.О. (2023). Вплив антропогенних джерел забруднення на якість річки Південний Буг. Екологічні науки, 2(47). https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.2-47.10*
10. *Біліченко Ю.О., Петрук Р.В. (2023). Аналіз загроз евтрофікації води серединної ділянки басейну річки Південний Буг. Сучасні технології в будівництві, 34(1), 177–182.*
11. *Водний фонд Миколаївської області. (2018). Вид. 3, онов. та доповн. Миколаїв. https://mkvodres.davr.gov.ua/sites/default/files/Водний%20%20фонд%20.pdf; https://davr.gov.ua/fls18/pivd_bug.pdf*
12. *Держводагенство. (2019). Водогосподарський баланс для басейну річки Південний Буг. https://davr.gov.ua/fls18/pivd_bug.pdf*
13. *Магась Н.І., Карпенко Г.В. (2023). Оцінка водогосподарської діяльності в басейні Південного Бугу на території Миколаївської області. У Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Чиста вода. Фундаментальні, прикладні та промислові аспекти» (9–10 листопада., м. Київ, Україна). https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/15035c52-6525-432c-97eb-6a9635cee39f/content*
14. *Магась Н.І., Трохименко А.Г. (2013). Оцінка сучасного антропогенного навантаження на басейн річки Південний Буг. Екологічна безпека, 2, 48–52. https://www.kdu.edu.ua/EKB_jurnal/2013_2(16)/Pdf/48.pdf*
15. *Шахман І.О., Бистрянцева А.М. (2021). Інтегральна оцінка якості води річки Південний Буг в умовах змінення клімату. Екологічні науки, 7(34), 162–166.*
16. *Trokhymenko, G., Magas, N., Gomelya, N., Trus, I., & Koliehova, A. (2020). Study of the process of electro evolution of copper ions from waste regeneration solutions. Journal of Ecological Engineering, 21(2), 29–38. https://doi.org/10.12911/22998993/116351*
17. *Horoshkova, L., Mevshov, O., Maslov, D., & Horoshkov, S. (2025). Environmental assessment of the war impact on the surface waters of the Dnipro River in the Zaporizhzhia city. XVIII International Scientific Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment», 1–5. https://eage.in.ua/wp-content/uploads/2025/04/Mon25-052.pdf*
18. *Horoshkova, L., Zaitsev, V., Ryshykov, I., & Shovkoplias, T. (2025). Environmental impacts of dredging operations on the condition of surface waters of the Danube River. XVIII International Scientific Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment», 1–5. https://eage.in.ua/wp-content/uploads/2025/04/Mon25-189.pdf*
19. *Horoshkova, L.A., Menshov, O.I., Korniichuk, Y.D., Horoshkov, S.V., & Maslov, D.V. (2025). Ecological assessment and forecasting of surface water conditions in the Dnipro river in Zaporizhzhia. Людина та довкілля. Проблеми неоекології, 43, 48–62. https://doi.org/10.26565/1992-4224-2025-43-04*

20. Horoshkova, L.A., Menshov, O.I., Korniichuk, Y.D., Horoshkov, S.V., & Ryshykov, I.V. (2025). Ecological assessment of surface water conditions of the Danube river. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія», 32, 6–22. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2025-32-01.
21. Nagpal, M., Siddique, M.A., Sharma, K., Sharma, N., Mittal, A. Optimising wastewater treatment through artificial intelligence: Recent advances and future prospects. Water Sci. Technol. 2024, 90, 731–757. https://iwaponline.com/wst/article/90/3/731/103673/Optimizing-wastewater-treatment-through-artificial
22. Procházková, M.; Touš, M.; Horňák, D.; Miklas, V.; Vondra, M.; Máša, V. Industrial wastewater in the context of European Union water reuse legislation and goals. J. Clean. Prod. 2023, 426, 139037. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652623031955
23. Ajtai, I, Anda, A, Roba, C, Botezan, C, Pişţea, J. Water Reuse in Agriculture Using a Comprehensive Methodology Based on PCA and Specific Indices. Water 2025, 17(13), 2011. https://doi.org/10.3390/w17132011

Authors Contribution: Lidiia Horoshkova – conceptualization, idea development, data analysis and interpretation, article writing; Oleksandr Menshov – idea development, data analysis and interpretation, modeling, article writing; Alla Nekos – data analysis and interpretation, article writing; Eduard Kochanov – data analysis, article writing; Yuliia Korniichuk and Stanislav Horoshkov – collection of primary data, its systematization and processing
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

References

1. Afanasiev, S. O. (Ed.). (2012). Assessment of the ecological status of the Southern Bug River in accordance with the requirements of the EU Water Framework Directive. Kyiv. 28. [in Ukrainian]
2. Lavryk, O. D. (2010). River landscapes of the Southern Bug as a promising basis for the formation of cultural landscapes. Scientific Notes of Vinnytsia State Pedagogical University. Series: Geography, 21, 156–166. https://dspace.udpu.edu.ua/xmlui/bitstream/handle/6789/184/23_Lavryk_nzvpu_21_156-166.pdf?sequence=1&isAllowed=y [in Ukrainian]
3. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2022). Flood risk management plan for specific areas within the Southern Bug River Basin District for 2023–2030. https://ips.ligazakon.net/document/KR2208953 [in Ukrainian]
4. Kurepin, V. M. (2020). Restoration and preservation of the Southern Bug's water resources. In Global risks in the formation of international environmental security (18–22). Mykolaiv: MNAU. [in Ukrainian]
5. Khilchevskyi, V. K. (Ed.). (2009). Water resources and quality of river waters in the Southern Bug Basin. Kyiv: Nika-Center. [in Ukrainian]
6. Magas, N. I. (2024). Assessment of the current state and environmental safety of river waters in the Southern Bug Basin in Mykolaiv Region. In Ecology. Environment. Energy Saving. 2024: Collective Monograph (17–30). https://nupp.edu.ua/uploads/files/0/events/conf/2024/v-edo/monog.pdf [in Ukrainian]
7. Smirnov, V. M., & Smirnova, S. M. (2014). Spatial interpolation of bottom sediment pollution in the Bug Estuary by heavy metals. Scientific Bulletin of Mykolaiv State University. Series: Biological Sciences, 13 (6.3), 97–102. http://mdu.edu.ua/wp-content/uploads/files/24_11.pdf [in Ukrainian]
8. Tymonchuk, K. A., & Vovk, V. M. (2020). Pollution dynamics in the middle and lower parts of the Southern Bug River Basin. In Strategies of innovative development of natural sciences: Conference Proceedings (70–72). Kropyvnytskyi. [in Ukrainian]
9. Sapko, O. Yu., & Kuryanova, S. O. (2023). Impact of anthropogenic pollution sources on the quality of the Southern Bug River. Ecological Sciences, 2(47). https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.2-47.10 [in Ukrainian]
10. Bilichenko, Y. O., & Petruk, R. V. (2023). Analysis of eutrophication threats in the middle part of the Southern Bug Basin. Modern Technologies in Construction, 34(1), 177–182. [in Ukrainian]
11. State Water Resources Agency. (2018). Water fund of Mykolaiv Region (3rd ed., revised and updated). https://mkvodres.davr.gov.ua/sites/default/files/Водний%20%20фонд%20.pdf [in Ukrainian]
12. State Water Resources Agency. (2019). Water management balance for the Southern Bug Basin. https://davr.gov.ua/fls18/pivd_bug.pdf [in Ukrainian]
13. Magas, N. I., & Karpenko, H. V. (2023). Assessment of water management activities in the Southern Bug Basin in Mykolaiv Region. In VII International Scientific-Practical Conference «Clean Water» (Nov 9–10). https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/15035c52-6525-432c-97eb-6a9635cee39f/content [in Ukrainian]
14. Magas, N. I., & Trokhymenko, A. H. (2013). Assessment of current anthropogenic load on the Southern Bug Basin. Ecological Safety, 2, 48–52. https://www.kdu.edu.ua/EKB_jurnal/2013_2(16)/Pdf/48.pdf [in Ukrainian]
15. Shakhman, I. O., & Bystryantseva, A. M. (2021). Integral water quality assessment of the Southern Bug River under climate change. Ecological Sciences, 7(34), 162–166. [in Ukrainian]
16. Trokhymenko, G., Magas, N., Gomelya, N., Trus, I., & Koliehova, A. (2020). Study of the process of electro evolution of copper ions from waste regeneration solutions. Journal of Ecological Engineering, 21(2), 29–38. https://doi.org/10.12911/22998993/116351
17. Horoshkova, L., Mevshov, O., Maslov, D., & Horoshkov, S. (2025). Environmental impact of war on Dnipro surface waters in Zaporizhzhia. In XVIII International Scientific Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment» (1–5). https://eage.in.ua/wp-content/uploads/2025/04/Mon25-052.pdf
18. Horoshkova, L., Zaitsev, V., Ryshykov, I., & Shovkoplias, T. (2025). Environmental effects of dredging on the Danube River waters. In XVIII International Scientific Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment» (1–5). https://eage.in.ua/wp-content/uploads/2025/04/Mon25-189.pdf
19. Horoshkova, L. A., Menshov, O. I., Korniichuk, Y. D., Horoshkov, S. V., & Maslov, D. V. (2025). Environmental forecasting of surface waters in the Dnipro in Zaporizhzhia. Human and Environment. Problems of Neoecology, 43, 48–62. https://doi.org/10.26565/1992-4224-2025-43-04

20. Horoshkova, L. A., Menshov, O. I., Korniichuk, Y. D., Horoshkov, S. V., & Ryshykov, I. V. (2025). Environmental assessment of Danube surface waters. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series: Ecology, 32, 6–22. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2025-32-01
21. Nagpal, M., Siddique, M.A., Sharma, K., Sharma, N., Mittal, A. Optimising wastewater treatment through artificial intelligence: Recent advances and future prospects. Water Sci. Technol. 2024, 90, 731–757. https://iwaponline.com/wst/article/90/3/731/103673/Optimizing-wastewater-treatment-through-artificial
22. Procházková, M.; Touš, M.; Horňák, D.; Miklas, V.; Vondra, M.; Máša, V. Industrial wastewater in the context of European Union water reuse legislation and goals. J. Clean. Prod. 2023, 426, 139037. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652623031955
23. Ajtai, I, Anda, A, Roba, C, Botezan, C, Pișteа, J. Water Reuse in Agriculture Using a Comprehensive Methodology Based on PCA and Specific Indices. Water 2025, 17(13), 2011. https://doi.org/10.3390/w17132011

Екологічна оцінка та прогнозування стану поверхневих вод річки Південний Буг на території Миколаївської області

Лідія Горошкова [1]
д. економ. н., професор, кафедра екології,
[1] Національний університет «Києво-Могилянська академія», Київ, Україна;
Олександр Меншов [2]
д. геол. н., ст. наук. співробітник, кафедра геоінформатики,
[2] Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна
Алла Некос [3]
д. геогр. н., професор,
кафедра моніторингу навколишнього середовища та охорони природи,
[3] Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, Україна;
Юлія Корнійчук [2,3]
магістр;
Станіслав Горошков [2,3]
бакалавр;
Едуард Кочанов [4]
к. військ. н., доцент,
кафедра хімії та хімічних засобів боротьби,
кафедра радіаційного, хімічного та біологічного захисту і екологічної безпеки,
[4] Військовий інститут бронетанкових військ Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

Питання водозабезпечення та водної безпеки актуалізувались на території України в умовах війни. З урахуванням того, що Україні має розгалужену водну інфраструктуру, яка включає великі багатоцільові водосховища, греблі гідроелектростанцій, охолоджувальні установки для атомних станцій та ін. вплив війни вже сьогодні є екологонебезпечним та катастрофічним. Крім того, в умовах військової агресії поверхневі та підземні води, а також атмосферне повітря зазнають прямого мілітарного впливу. Цей вплив є відчутним як для головних річок, таких як Дніпро, Південний Буг, Інгул, Сіверський Донець, так і для малих річок, а також природних та штучних водойм, прибережних зон Азовського та Чорного морів. Саме тому актуальним є дослідження антропогенного впливу, у т.ч. і під час військових дій, для річки Південний Буг, яка є важливим стратегічним ресурсом для екологічного, соціального та економічного розвитку Миколаївської області України. У роботі представлено результати комплексної екологічної оцінки якості поверхневих вод річки Південний Буг в місті Південноукраїнськ Миколаївської області за період 2003–2024 рр. Досліджено динаміку ключових показників якості води, зокрема вмісту фосфатів-іонів, амонію, сульфатів-іонів, хлорид-іонів, біохімічного споживання кисню ($БСК_5$) та рівня розчиненого кисню. На основі даних Лабораторії моніторингу вод та ґрунтів РОВР у Миколаївській області проведено прогнозування динаміки вмісту забруднюючих речовин за допомогою регресійних моделей та оцінено здатність річки до самоочищення. Отримані результати аналізу дозволяють дійти висновку, що водна система р. Південний Буг у районі с. Олексіївка (с. Панкратове) має стійке біогенно-органічне навантаження, посилене у 2020–2024 рр. Зростання вмісту азоту, фосфатів, ПАР та гербіцидів вказує на систематичний вплив побутових і аграрних джерел забруднення. Тренди ХСК/$БСК_5$ у поєднанні зі зниженням розчиненого кисню свідчать про зниження аераційного потенціалу та ризик гіпоксії. Встановлено, що основне антропогенне навантаження створює промисловість, сільське господарство та комунальні підприємства. Було здійснене прогнозування рівня антропогенного навантаження за основними забруднювачами з використанням регресійних рівнянь та визначені прогнозні рівні фосфат-іонів, амоній-іонів, сульфат-іонів, хлорид-іонів, БСК5 та кисню розчиненого у поверхневих водах р. Південний Буг.

Ключові слова*: поверхневі води, екологічна оцінка, антропогенне навантаження, забруднення вод, кореляційний аналіз даних, регресійний аналіз, прогнозування.*

Внесок авторів: Лідія Горошкова – концептуалізація, ідея, аналіз та інтерпретація даних, написання статті; Олександр Меньшов – ідея, аналіз та інтерпретація даних, моделювання, написання статті; Алла Некос – аналіз та інтерпретація даних, написання статті; Едуард Кочанов – аналіз даних, написання статті; Юлія Корнійчук та Станіслав Горошков – збір вихідних даних, їх систематизація та обробка
Надійшла 13 липня 2025 р.
Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів
Прийнята 14 серпня 2025 р.

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-41
UDC 502.1(4):[911.53:502.51(282.247.318)](477.44-25)

Received 20 June 2025
Accepted 11 August 2025

Seliteb hydraulic network in the context of the implementation of EU environmental protection strategies

Anatoliy Hudzevych [1]
DSc (Geography), Professor, Department of Geography,
[1] Vinnytsia State Pedagogical University named after Mikhail Kotsyubynsky, Vinnitsa, Ukraine,
e-mail: amarek@ua.fm, https://orcid.org/0000-0001-8884-9436;
Hanna Korobkova [2]
PhD (Geography), Associate Professor,
Department of Ecology and Biotechnology in Plant Production,
[2] State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: korobkova.ann@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-0246-8585;
Maryna Shmahelska [3]
PhD (Geography), Associate Professor,
Department of Humanitarian, Economic and Financial and Accounting Disciplines,
[3] Vinnytsia Cooperative Institute, Vinnytsia, Ukraine,
e-mail: marinashmahelska@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4680-5272;
Nataliia Baiurko [1]
PhD (Pedagogy), Associate Professor, Department of Biology,
e-mail: nataliia.baiurko@vspu.edu.ua, https://orcid.org/0000-0002-6172-9669

ABSTRACT

Problem statement. The article examines the structural organization of the Southern Bug basin, operating under urban conditions. This involves obtaining detailed objective information about its condition, which is determined by the need to harmonize this process with European standards in the field of hydrography and with UN Sustainable Development Goals (SDGs).

The purpose of this study is to inventory the watercourses of the Southern Bug basin within the Vinnytsia city catchment area, assess their ecological state and functional problems, and provide a basis for management decisions.

Methods. Classical and modern methods of hydrological, structural-geographical, structural-functional, analytical, remote sensing, instrumental, cartographic, mathematical, and comparative-geographical analyses were applied. The central part of the materials was collected by the authors of the publication during field etymological studies of water bodies of Vinnytsia city, when performing scientific research work in 2023-2024.

Results of the study. The study clarified the location and nature of the discharge capabilities of previously identified watercourses. At the same time, an assessment of the elements of the hydrological regime and morphometric features within the basins was conducted. An inventory of the current state of watercourses in Vinnytsia city enabled us to identify technogenic violations in some of them that developed during the urban development of the territory. It has been established that intensive anthropogenic loading of small-river basins leads to significant transformation of the original natural valley-river landscape, up to its complete disappearance. Focusing research on local needs helps structure efforts in responsible consumption (SDG 12), combating climate change (SDG 13), and preserving ecosystems (SDG 15), which is important for restoring the environment transformed by unsustainable consumer practices.

Conclusions. The results of the study on the structural organization of the Southern Bug basin in the conditions of Vinnytsia city can significantly expand and activate areas of rational water resource management, ensuring their balanced functioning. They have a decisive influence on the planning of optimal water-use scenarios in urban environments, not only at the local but also at the regional and state levels. The results of the study are the basis for developing a strategy for the urban community and achieving the Goals of balanced development and effective management of territorial resources, as well as for scientific and educational purposes.

Keywords*: Sustainable Development, watercourse, stream, small river, hydrographic network, catchment basin, valley-river landscape, settlement, Vinnytsia city.*

In cites: Hudzevych Anatoliy, Korobkova Hanna, Shmahelska Maryna, Baiurko Nataliia (2025). Seliteb hydraulic network in the context of the implementation of EU environmental protection strategies. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 556-565. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-41

Problem statement. In the context of global climate change and rapidly growing anthropogenic impacts on the environment [24, 31], the issue of the rational use of available water resources [22, 28, 29] is of particular relevance. The bulk of freshwater reserves in the world and Ukraine fall on small rivers - the most numerous types of water bodies on Earth [32]. Over the past hundred years, under the slogan of "restructuring nature", significant losses have occurred not only of valuable water bodies of nature, but also of their aesthetic features.

Valley-river landscapes of small rivers have turned out to be the most transformed objects of nature, especially in the conditions of settlement, and above all, the urban environment [1, 26]. At the same time, in the efforts of residents to provide

© Hudzevych Anatoliy, Korobkova Hanna, Shmahelska Maryna, Baiurko Nataliia, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

themselves with amenities and comfort, almost the best opportunities for preserving natural (or close to it) landscape and biotic diversity, which are possessed by valley-river landscape complexes, are completely ignored [13, 25, 27].

One of the reasons for the transformation of watercourses, up to their disappearance, was the practice of inventorying water bodies, which was used by the Hydrometeorological Service of Ukraine until almost our time. According to it, the catchment areas of all rivers, the length of which is more than 10 km, were considered. While their tributaries, up to 10 km long, were either ignored altogether or perceived as nameless streams.

The adoption of the Water Code (1995) [4] by independent Ukraine and its conformation with the UN Sustainable Development Goals [33] and the EU Water Framework Directive (WFD) (2000) [3] requires updating the hydrographic network data it encourages a revision of the registers of water bodies that were concluded before this. According to the Water Code of Ukraine (1995, Chapter 16. Article 79), the classification of rivers by basin area is adopted: small – up to 2000 km^2; medium – 2 000-50 000 km^2; large – over 50 000 km^2. The classification of rivers of the EU countries (small – 10-100 km^2; medium – 100–1 000 km^2; large – 1 000-10 000 km^2; very large – over 10 000 km^2 [3]) is used in our country when assessing the EcoState of surface water masses.

The uncertainty and lack of standardization of the concepts of “stream” and “small river” in Ukraine and the EU [22] influenced our use of the general term “watercourse” (type of water body) when considering the valley-river landscape. According to the classification of water bodies, a watercourse encompasses both significantly modified water bodies (rivers, streams) and artificial ones (canals).

Analysis of recent research and publications. For the first time, the experience of implementing the provisions of the EU WFD in domestic science and practice, particularly, the typification of rivers by catchment area, was applied by hydrologists in studies of the hydrographic network of the Ros River basin [10] and the Vistula tributaries (Western Bug and San) [22].

The reference manual compiled at the beginning of the 21st century by M.M. Palamarchuk and N.B. Zakorchevna “Water Fund of Ukraine” [5], unfortunately does not consider the catchment areas of rivers less than 10 km long. The reference books compiled at this time in the context of individual administrative-territorial regions of Ukraine, particularly, Vinnytsia and Kirovohrad regions [7; 16], do not solve the problem either.

A typical example is the Southern Bug River (Southern Bug), which divides of Vinnytsia city into two parts. The length of this river within the city limits is 14 km. Despite the large number of tributaries of the Southern Bug within the city limits, information about them was absent. Only four tributaries of the Southern Bug had their established names with corresponding reflection on maps, at least at the beginning of the 21st century. These are rivers such as Vyshnia, Vinnytsia (Vinnychka), Tyazhyliv, and Pyatnychanka. Of all the small rivers of Vinnytsia city, the three most famous for the townspeople are Vyshnia, Tyazhyliv, and Vinnytsia. And of all the rivers of the city, only the Vyshnia River is represented in the “Dictionary of Hydronyms of Ukraine” [11].

At the regional and local level (Vinnytsia region, Vinnytsia city), hydronymic studies of rivers and reservoirs were actively carried out in the 20th century by M.T. Dolenko, V.T. Horbachuk, L.T. Masenko, N.M. Pavlykivska. In the early 20s of the 21st century, the research of A.V. Gudzevych clarified the reasons and factors of the historical transformation of the name of the Orikhovatka River (the Ros River basin, Pogrebyshchensk territorial community, Vinnytsia district) and made proposals for the reconstruction and reproduction of 22 lost geographical names of hydronyms [12]. Information about the watercourses and reservoirs of the region is contained in catalogues prepared in the first half of the 20th century. The first basin hydrographic sketch with the calculation of the lengths and areas of the rivers of the Boga system (now the Southern Bug) was compiled in 1918. It had the form of a notebook, but unfortunately it was not printed for wide use. Instead, in the period from December 1922 to November 1923, the employees of the hydrometric service compiled the "Catalogue of Rivers of the Southern Boga Catchment". Published in the "Yearbook of the Hydrometric Service of the People's Commissariat of Land of Ukraine" (1927, pp. 49-54). The catalogue included only rivers 10 km long with data on their length, drainage area, and average direction from "the source to the mouth of each river drainage area" [2, p. 24]. The reconciliation of these two catalogues, considering the difference in measurements of the length of watercourses and the area of the drainage basin of each of them, was reflected in the work of O. Byrulya, published in 1928 [2].

An important source of information about the hydronyms of the region is the “Register of Rivers of Vinnytsia Region”, compiled based on systematization of hydrological and hydronymic research over a period of more than 25 years by the leading hydrologist of the Southern Bug River Water Resources and Environment Department Yu.S. Gavrykov. In the previous 2 editions (2011, 2018), the “Catalog of Rivers of Vinnytsia Region” (over 10

km long) and cartographic maps M: 1:100,000 of the Kyiv Military Cartographic Factory were taken as the basis. The updated "Register…" of 2024 is supplemented with information about rivers over 5 km long [6]. Despite significant additions to the content of the "Register…" (2024) during its compilation, watercourses of Vinnytsia city less than 5 km long and transformation processes regarding them are ignored, which requires an urgent solution.

Identification of previously unresolved parts of the general problem. Effective water resources management involves obtaining detailed objective information about the state of the hydrographic network and is determined by the need to comply with European standards in this area. A clear accounting of water bodies, with the correct use of names, and their monitoring will help to clarify the real EcoState, determine possible economic changes in the river basin with rational water use, restoration and protection of watercourses depending on the need.

The purpose of this study is to inventory the watercourses of the Southern Bug basin within the Vinnytsia area by catchment area, to determine their EcoState and problems of functioning in order to form the basis for making management decisions.

Research material and methods.

The object of the study is the watercourses of Vinnytsia city. The subject is the implementation of the provisions of the EU WFD through inventory with determination of the structure of river basins of Vinnytsia watercourses.

Research methods. To establish the organizational structure of the hydrographic network of the Southern Bug (number, length and area of basins of different order watercourses) and its hydronymy within the Vinnytsia city, classical and modern methods of hydrological, structural-geographic, structural-functional, linguistic and general scientific historical analysis were applied. They included field route and semi-stationary methods of field and geoinformation mapping, as well as landscape-ecological, geobotanical, bioindication study of territorial subdivisions of the urban environment. Based on the system approach, the comparative-historical and questionnaire-survey method and office methods of processing and analysing the hydrographic network were used, particularly, decoding of high-precision satellite images of the urban and suburban area, methods of historical-urban reconstructions, mathematical-statistical methods.

The materials for the study were field forms and diaries, results of analytical processing, topographic and thematic maps of various scales, high-resolution satellite images, technical and design documentation of various city services and design organizations, stock and archival materials. The main part of the materials was collected during field research by the authors of the publication while performing research work on etymological studies of water bodies in Vinnytsia city.

Field work was carried out within the framework of the city's environmental project for the preservation of water bodies of the city "Concept for the Development of Small Rivers of Vinnytsia city - 2035" (2024). This work was also guided by key documents, in particular: the Leipzig Charter and the EU WFD, the Declaration on the Green Course of Vinnytsia (following the example of the European Green Course) with the Roadmap of Activities of the Vinnytsia Urban Territorial Community for the Implementation of the Green Course of Vinnytsia city by 2030, the Water Code of Ukraine, the Concept of Integrated Development of Vinnytsia city 2030, the Strategy for the Development of the Vinnytsia Urban Territorial Community by 2030 (Strategy 3.0), as well as the Environmental Protection Program of the Vinnytsia Urban Territorial Community.

Presentation of the main material of the study. The river basin is a holistic systemic formation in which the main types of substance circulation are closed. Hence, the widespread use of the basin approach by scientists in assessing the quality of environmental components and solving problems of rational use of natural resources and geoecological state of the territory [21].

According to the landscape and hydrological zoning of Ukraine, the Vinnytsia city is located within the forest-steppe, insufficiently humidified landscape and hydrological zone of the Southern Bug basin [9], the Southern Bug basin district according to hydrographic zoning [23] and the Upper Bug subdistrict of the Dniester-Bug district of the catchment areas of Ukraine according to the conditions of formation of annual water runoff [8, p. 30]. The hydrographic network of the city is formed by the Southern Bug River. According to the current Water Code and the EU WFD [3; 4], it is a surface water object and is classified as a large river.

With the introduction of the European water resources monitoring system and the need to implement the EU WFD from January 1, 2019, Ukraine has become necessary for a detailed assessment of the entire basin of the city's main river. In 2023, specialists from the Vinnytsia Urban Development Institute identified 64 water linear objects belonging to the Southern Bug basin and being its 1–3 order tributaries [15]. The identified objects required assessment based on their identification (small river, stream, canal). When studying the state of surface waters of Vinnytsia city (Fig. 1) by the authors of the publication at the turn of 2023-2024, in order to systematize the idea of the features of the hydrographic and toponymic space of Vinnytsia city, as an object of structural and geographical research, there

was a need for a detailed study of their structural and functional organization.

The Southern Bug watershed within the city is formed by numerous watercourses – small rivers with tributaries of the 1st–4th orders, streams and canals. The total length of watercourses exceeds 100 km, and the density of the hydrographic network is 1.05 km/km^2. The following rivers are distinguished with a length of over 10 km: the Vyshnia River (total length 22.7 km, within the city – 5.85 km), the Vinnytsia (Vinnychka) River (total length 13 km, within the city – 5.988 km), the Tyazhyliv River (Tyazhylivka – total length 14 km, within the city – 4.3 km). The Verbyzhivka River (total length 9 km, within the city – 5.3 km), the Pyatnychanka River (total length 7.4 km, within the city – 3.580 km) has a length of over 5 km. Only three rivers have their own 2nd-3rd order tributaries – Vyshnia River, Pyatnychanka River, and Vinnytsia (Vinnychka) River (Fig. 1).

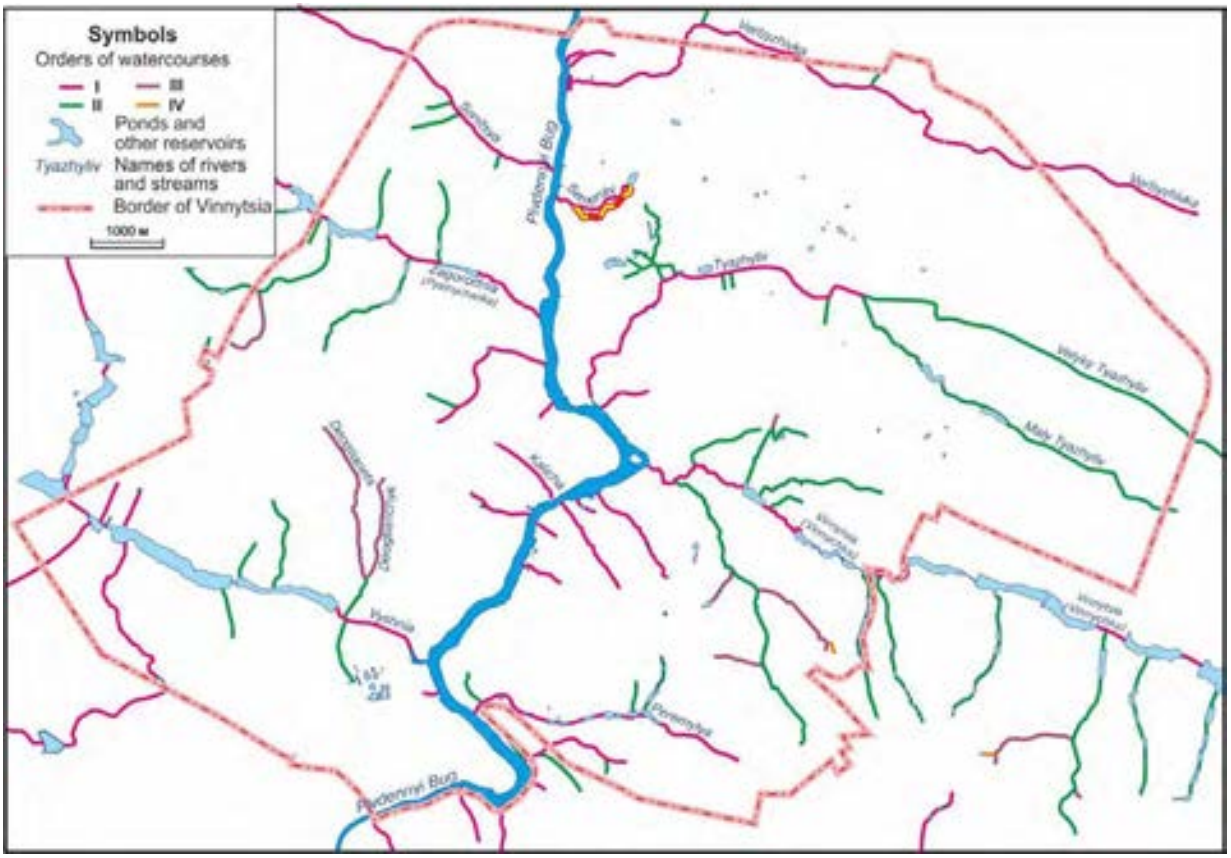


Fig. 1. Structure of the hydraulic network of the Southern Bug catchment in Vinnytsia city

Tributaries of the Southern Bug River are characterized by small channel depths (up to 1–2 m), widths (0.5–4 m) and current speeds (0.2–0.6 m/s). The exception is the mouth of the Vyshnia River, where the channel width reaches 15–25 m. In their original natural state, their channels had a winding character within the floodplain box-shaped and trapezoidal river valleys.

In total, out of 76 identified watercourses, 68 belong to small rivers and streams. The exception is 8 “ditches” of the technogenic type. They are defined as artificial water bodies – canals. All these canals are equipped as drainage linear objects. Seven of them are along communication routes: the bypass highway of the northwestern outskirts of Vinnytsia city (Pyatnychanka inlet No. 11), St. Gonty (10a, 10b, 10c) and railways (left tributaries of the Tyazhyliv River – 16a, 16b, 16c).

At the present stage, most watercourses operate within the intensively built-up territory of the city. Typical problems are closing of channels into underground collectors, creation of artificial channels (chutes), land reclamation through drainage, artificial changes in the relief, creation of artificial reservoirs. Collectors and "chutes" separate water from other elements of the ecosystem – plants, soil, underwater nutrition – thus, in these areas the river is not able to fully function [15, p.13].

The small rivers Vinnytsia (Vinnychka), Peremylya, Tyazhyliv, Verbyzhivka and Pyatnychanka have long been regulated by ponds due to the active development of bird farming. This is also confirmed in the acts of land demarcation of the 16th – 1st half of the 16th century. [17, p. 99, 207-208]. According to the Southern Bug River Water Management Department, there are 35 ponds and numerous channel-type ponds within the city limits (rivers basins of Vinnytsia (Vinnychka), Vyshnia, Peremylya, Tya-

zhyliv rivers). The largest of them, in terms of water surface area, are located on the Vyshnia and Pyatnychanka rivers. There are more than 60 artificial reservoirs in the Peremylya river basin.

Field field surveys made it possible to prove several cases of erroneous ideas of researchers about the flow of watercourses of the Left Bank of the Southern Bug, including those recorded on map schemes [15]. First of all, these are watercourses No. 9, 10, 21, 36 and 38 (Figure 2).

It has been established that the upper reaches of watercourse No. 21 (Nadparomna) from the mid-19th century or somewhat later (during the development of Stetsenko Street, the car park area), but not earlier (it is clearly visible on the map of 1802 [14]), were “torn off” from the main river and directed towards the Southern Bug by a ravine or a gully. There, by introducing the channel into the sewer pipe, the left tributary No. 21 was diverted. As a result, the mouth part was shifted towards the Tyazhyliv River, and the length of the watercourse was reduced, as was its catchment basin. The channel part of the valley of the middle and lower reaches of the watercourse, due to the lack of water, from the mid-20th century was developed by private estates and city buildings for various purposes (bus station, printing house, etc.). During World War II, the watercourse valley was undeveloped [30].

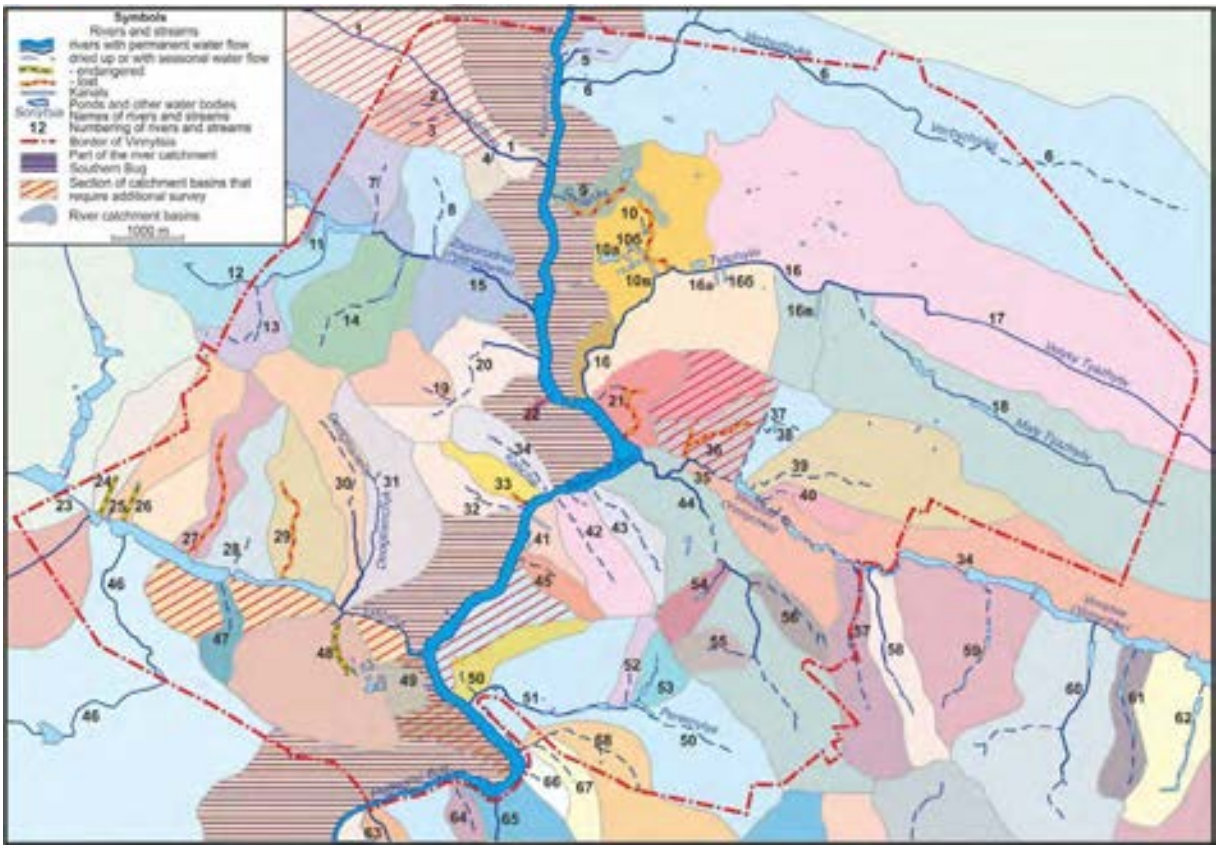


Fig. 2. Basin system of the Southern Bug watershed within the Vinnytsia city

A similar misfortune happened with watercourse No. 36-38. The reason for the deliberate artificial rupture of its channel (Fig. 2) in the middle reaches (current No. 36 and No. 38) was the construction of the Kyiv-Baltic (Kyiv-Odessa) railway (put into operation in 1871) and the opening of railway communication in 1873 on the Kozyatyn - Zdolbuniv, Vinnytsia city, Zhmerynka railway. However, these actions led to the formation of two watercourses: a "relict" and an artificially created one (No. 36 and No. 38, Fig. 2). Another example is related to the development of the watercourse basin through intensive development with industrial facilities in the middle of the 20th century. The stream (No. 9) is known from descriptions as the Semenka River, which once served as the border of urban lands in the north-eastern reaches of Vinnytsia city [18, p. 22]. The upper and middle reaches of the river were pressed into pipes and filled with soil mixtures. Due to the proximity of the sources No. 9 and No. 10, which can be seen on the map of F. Schubert (mid-19th century), researchers mistakenly perceived the middle course of stream No. 9 as the source of stream No. 10. The modern canalized appearance of the latter is due to water reclamation measures carried out in the middle of the twentieth century.

In general, within the city limits, a third of the area of the stream valleys was filled in. Their channels were also found underground. By the beginning

of the 21st century, watercourses were mainly transformed at intersections with transport highways (the Vyshnia River – Barske Highway, Yunosti and Pyrohova streets; the Vinnytsia (Vinnychka) River – D. Nechaya, Pryvokzalna, Chumatska, Hetmana Mazepy streets, etc.; the Dyogtianets River – Khmelnytsky Highway, Keletska and K. Vasylenko streets). The railway fragmented the Vinnytsia (Vinnychka) River and its tributaries, the Tyazhyliv and Verbyzhivka rivers.

Only the tributaries of the Sonytsia River in the northwest of Vinnytsia city and the tributaries of the Southern Bug in the Sabarivsky forest avoided the rupture of the valley-river complex with a road and street network.

Since the beginning of the 21st century, the construction of new residential complexes directly on watercourses has become a negative trend: the Dyogtianets River – 28A Keletska Street, WOG gas station, Oscar residential complex; Kalicha River – Residential Complex "Artynov Hall"; Tyazhiliv River – Residential Complex "Naberezhnyi Kvartal" and "Naberezhnyi Kvartal 2", Residential Complex "Komfort" and municipal housing on St. Striletska; River No. 32 (Skelna) – Residential Complex "Riviera", Residential Complex on Amosova Lane.

Unfortunately, the practice of "filling" the valley-river landscape with poorly controlled residential development within Vinnytsia city continues to this day. For example, watercourses No. 24 and No. 26 are left tributaries of the Vinnytsia (Vinnychka) River (Dream Lake residential complex). Similar changes also affected the mouth of watercourse No. 8 (left tributary of the Pyatnychanka River) during the development of the Town House.

Since the beginning of the 21st century, cases of “appropriation” of watercourses have become more frequent (the Kalicha River basin (No. 32), Peremyl (No. 50, etc.). Negative trends are also maintained by introducing changes in the morphological structure of watercourses. In particular, in the summer of 2023, the relief of the mouth of the Pyatnychanka River basin was changed. This happened because of the embankment of soil along the coastal protective strip and the introduction of the channel into a concrete pipe with subsequent discharge into the Southern Bug River. In the spring of 2025, as a result of the pouring of soil mixture and clay-sand-gravel material, a swampy stream outlet on the southwestern outskirts of Vinnytsia city was destroyed. These works were carried out in violation of the requirements of Articles 80, 88, 89 of the Water Code of Ukraine and Articles 59, 60 of the Land Code of Ukraine.

A significant number of Vinnytsia's watercourses are placed in underground collectors. For example, in the historical centre (New City, Zavallia), the Kalicha River (No. 32) has survived only in small fragments near Khlibna Street, before and after Koriatovychiv Street. Watercourses No. 27 and No. 29, which are tributaries of the Vyshnia River, as well as No. 9, No. 21, No. 33 and No. 36, were completely underground.

These and other cases of unauthorized interference in the "cultivation" of river valleys became possible due to the lack of boundary marking for the water protection zones of almost all watercourses in Vinnytsia city, regardless of their hierarchy. It is planned to begin the process of marking the coastal protection strips in nature with the imminent approval of the Comprehensive Plan for Spatial Development of the Community and the General Plan of Vinnytsia city. The preservation and restoration of the city's valley and river landscapes should be facilitated by Vinnytsia's inclusion in the European initiative RESTORIVER and the European projects U_CAN (Tyazhyliv River) and DALIA (Vinnytsia River) in the spring of 2005. These projects help determine modern methods of water resource management and adaptation to climate change.

In our opinion, in order to preserve watercourses in urban conditions, it is necessary to overcome the harmful practice of filling up valleys during economic development of the territory. In case of need to cross valleys with a transport highway, it is worth using gabions (metal meshes filled with gravel) to ensure natural drainage and resistance to destruction of river valley elements and artificial formations such as dams. Along the banks of watercourses (in particular, low orders), it is worth creating plantations of tree and shrub vegetation (in their absence), which will prevent small rivers and streams from drying up during the summer low water period.

Given the importance of the cultural heritage of individual tributaries of the Southern Bug, it is necessary to consider the issue of their protection as soon as possible. After all, small rivers for centuries performed boundary functions of Vinnytsia’s lands (Verbyzhivka, Sonytsia, Peremylya rivers) and were centres of industries: bird farming – Sonytsia and Pyatnychanka rivers, milling – Peremylya river. In addition, these rivers have relatively better-preserved pre-valley areas, in contrast to the reduced tributaries of the industrial and residentially developed part of the city. The mouth area of river No. 45 (Krutyy Yar) is also distinguished by a little-changed channel-floodplain part with preserved rapids and pseudo-waterfalls ("waterfalls"). The need to preserve the entire valley-river system of these watercourses will prompt the creation of a protected area at the level of a landscape reserve. The area of the southwestern outskirts of Vinnytsia city (the Vyshnia river basin) also requires environmental

attention. Intensive development of cottage and estate-type buildings poses a threat to the only spring in this part of the city, Vyshenske, with water suitable for drinking. It is the source of the stream of the same name. This stream, together with the spring, is worthy of human care and protection as a hydrological monument of nature.

Conclusion. An inventory of watercourses in the urban residential area of Vinnytsia was conducted to determine the structure of river basins to implement the provisions of the EU WFD in local water resources management practices.

During a study of the structural organization of the Southern Bug River basin in an urban environment, rivers were classified by catchment area for the first time. This work, conducted in accordance with the parameters of the EU WFD, made it possible to identify a few significantly changing watercourses, a previously insignificant list of small rivers and streams in Vinnytsia. All prominent watercourses in the urban environment were considered. Their length and catchment area were measured and displayed on a unified cartographic basis. A barrier to clearly defining the status of "small river" or "stream" for a watercourse is the lack of regulation of these concepts in the Water Code of Ukraine or the EU WFD, and therefore a clear boundary between them. The identification materials included data on the number and length of all rivers, temporary streams and creeks, as well as branches and permanent canals with a length of at least 0.5 km.

An inventory of the current state of the city's rivers allowed us to: determine the structural, functional, and ecological state of the valley-river complexes; identify man-made disturbances to individual rivers and significant transformations of the original natural valley-river landscape that developed during the urban development of the area.

It has been observed that the intensity of anthropogenic transformation of valley complexes directly depends on the nature of urban development processes. Specifically, estate development in Vinnytsia's urban landscape has largely preserved the natural structural and functional properties of valley complexes over many centuries and has had little noticeable impact on riverbed processes. In turn, high-rise construction or any economic development of urban areas leads to their transformation, even to the point of complete destruction. Due to their vulnerability, Vinnytsia's waterways require extensive environmental protection. The best opportunities for preserving watercourses are in territories with a special land use regime (recreation parks – Vyshensky and Pyatnychansky, forest areas – Sabarivsky and Prybuzky and the forest park).

Acknowledgments. The authors express their gratitude for assistance in conducting the study to V. Lyubchenko.

Bibliography

1. *Байрак, Г.Р.(2016). Руслова мережа Львова: зміни за історичний період та сучасний стан. Вісник Львівського університету. Сер. геогр.,(50), 3–21.*
2. *Бируля, О. (1928). Ріка Бог та її сточище: матеріали до гідрології ріки та використання її енергії. У Вінниці: Віндерждрук.*
3. *Водна Рамкова Директива ЄС 2000/60/ЄС (2006). Основні терміни та їх визначення. Київ.*
4. *Водний кодекс України від 06.06.1995 № 213/95/ (1995). Відомості Верховної Ради України(24), 189 (зі змінами та доповненнями протягом 2000-2024 рр.).*
5. *Гавриков, Ю.С. (2014). Реєстр річок Вінницької області (довжиною понад 5 км). Вінниця: Басейнове управління водних ресурсів річки Південний Буг.*
6. *Гавриков, Ю.С. (2011). Реєстр річок Вінницької області. Вінниця-Київ: Чорноморська програма Ветландс Інтернешнл.*
7. *Горбачова, Л.О., Христюк, Б.Ф. (2016). Гідрологічне районування території України за умовами формування річного стоку води на основі кривих Ендрюса. Український географічний журнал (3),27–33. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/UGJ_2016_3_6*
8. *Гребінь, В.В. (2010). Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз) : монографія. Київ: Ніка-Центр.*
9. *Гребінь, В.В., Хільчевський, В.К., Сташук, В.А., Чунарьов, О.В., Ярошевич, О.Є. (Уклад.). (2014). Водний фонд України: Штучні водойми-водосховища і ставки: Довідник. Київ : «Інтерпрес».*
10. *Гребінь, В.В., Хільчевський, В.К., Бабій, П.О., Забокрицька, М.Р. (2015). Оцінка річкової мережі басейну Росі за типологією річок згідно Водної рамкової директиви Європейського Союзу. Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія, 2(37), 23–33. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/glghge_2015_2_4*
11. *Гудзевич, А.В.(2015). Гідроніми Вінниці: історія й сьогодення формування. Краєзнавство: наук. журн., (1), 80-92. URL: http://kraieznavstvo.history.org.ua/doc/ kraeznavstvo _2025_1_10*
12. *Гудзевич, А.В. (2024). Гідронімія водозбору р. Оріховатки (басейн р. Рось) як джерело ідентифікації місцевості. Історико-географічні дослідження в Україні, (18), 33-55. URL: http://resource.history.org.ua/publ/Igdu_2024_18_4*
13. *Гудзевич, А.В. (2012). Просторово-часова організація сучасних ландшафтів : теорія і практика [монографія]. Вінниця: Віндрук.*
14. *Карта Вінниці 1802 р.(1802). URL: Карта Вінниці 1802 р_.jpg - Google Диск*

15. Концепція розвитку малих річок Вінниці 2035 (2023). Вінниця: КП «Інститут розвитку міст».
16. Кривульченко, А.І.(2011). Водні об'єкти Кіровоградської області. Частина І. Словник водних об'єктів. Частина ІІ. Атлас гідрографічної мережі. Класифікатор водотоків. Водосховища: Монографія. Кіровоград: Імекс.
17. Отамановський, В.Д. (1993). Вінниця в XIV-XVII століттях. Історичне дослідження. Вінниця: «Континент-прим».
18. Петренко, О.С. (1993). З історії відмежування вінницьких міських земель у XVI-XVII ст. Вінниці – 630. 1363–1993: матеріали І Вінниц. наук.-теорет. конф. Вінниця, 19–25.
19. Словник гідронімів України (1979). Київ: Наукова думка.
20. Туристична схема. Вінниця (1976). URL: https://unc.ua/uk/auction/vinnica-plan-turisticheskaya-shema-1976-god-ukraina-sssr-107119#lot-gallery-1
21. Ухань, О., Осадча, Н. (2023). Навантаження біогенними елементами та органічними речовинами річок басейну Дону (суббасейн р. Сіверський Донець). Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (59), 320–328. DOI: https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-24
22. Хільчевський, В.К., Гребінь, В.В., Забокрицька, М.Р. (2016). Оцінка гідрографічної мережі району річкового басейну Вісли (Західного Бугу та Сану) на території України згідно типології Водної рамкової директиви ЄС. Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія, 1 (40), 32–44.
23. Хільчевський, В.К., Гребінь, В.В. (2017). Гідрографічне та водогосподарське районування території України, затверджене у 2016 р. – реалізація положень ВРД ЄС. Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія, 1(44), 8–20.
24. Huang, B., Yin, X., Menne, M. J., Vose , R., Zhang, H. (2025). NOAA Global Surface Temperature Dataset (NOAAGlobalTemp), Version 6.0.0. NOAA National Centers for Environmental Information. DOI: https://doi.org/10.25921/rzxg-p717
25. Hudzevich, A., Matviichuk, O., Korobkova, H., Hudzevich, L., Bronnikova, L. (2023). Degradation risks and prospects for valley and river landscapes conservation in east Podilsk Transnistria (on the example of the Nemiya river). Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series «Geology. Geography. Ecology», (58), 321–335. DOI: https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-24
26. Hudzevych, A.V., Nikitchenko, L O., Hudzevych, L.S., Bronnikova, L.F., Demets, R.O. (2021). Approaches to organize the econetwork of the Transnistria region in the conditions of urban landscape. Journal of Geology, Geography and Geoecology,30 (3), 449–459. DOI: https://doi.org/10.15421/112141
27. Matviichuk, O., Hudzevich, A., Shevchuk, O., Korobkova, H. et al. (2024). Biodiversity centers of fauna in the urbanized landscape of Eastern Podillia: taxonomic richness and conservation prospects. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series «Geology. Geography. Ecology», (58), 379-388. DOI: https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-28
28. Rybalova, O., Malovanyy, M., Bondarenko, O., Proskurnin, O., Belokon, K. & Korobkova, H. (2022). Method of Assessing the Potential Risk to the Health of the Population During Recreational Water Withdrawal. Journal of Ecological Engineering, 23(5), 81–91. DOI: https://doi.org/10.12911/22998993/146998
29. Seelen, L.M.S., Flaim, G., Jennings, E., De Senerpont Domis, L.N. (2019). Saving water for the future: Public awareness of water usage and water quality. Journal of Environmental Management, 242, 246–257. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.047
30. Stadtplan Winniza (1943). URL: https://depo.vn.ua/sites/default/files/u1/vinitca_german_.jpg
31. State of the Global Climate 2024 (2025). WMO, 1368. URL: https://library.wmo.int/idurl/4/69455
32. Tsaryk, L.P., Kovalchuk, I.P., Tsaryk, P.L., Zhdaniuk, B.S., Kuzyk, I.R. (2020). Basin systems of small rivers of Western Podillya: state, change tendencies, perspectives of nature management and nature protection optimization. Journ. Geol. Geograph. Geoecology, 29(3), 606–620. DOI: https://doi.org/10.15421/112055
33. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development: draft resolution referred to the United Nations summit for the adoption of the post-2015 development agenda by the General Assembly at its 69th session (2015). URL: https://digitallibrary.un.org/record/803352?v=pdf&ln=es

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

References

1. Bayrak, G. R. (2016). The channels of river of Lviv: transformation during the historical epoch and modern stage. In Visnyk of the Lviv University. Series Geography, (50), 3–21. [in Ukrainian].
2. Byrulya, O. (1928). The Bog River and its outlet: materials on the hydrology of the river and the use of its energy. Vinnytsia: Vinderzhdruk. [in Ukrainian].
3. EU Water Framework Directive 2000/60/EC. Key terms and their definitions (2006). Kyiv. [in Ukrainian].
4. Water Code of Ukraine dated 06.06.1995 No. 213/95/ (1995). Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine, 24, 189 (with amendments and additions during 2000-2024). (in Ukrainian).

5. *Havrikov, Yu.S.(2024). Register of rivers of Vinnytsia region (over 5 km long). Vinnytsia: Basin Administration of Water Resources of the Southern Bug River. [in Ukrainian].*
6. *Havrykov, Y.S. (2010). Register of rivers of Vinnytsia region. Vinnytsia-Kyiv: Black Sea Program Wetlands International. [in Ukrainian].*
7. *Horbacheva, L.O., Khrystyuk, B.F. (2016). Hydrological zoning of the territory of Ukraine according to the conditions of formation of annual water runoff based on Andrews curves. Ukrainian Geographical Journal, 3, 27–33. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/UGJ_2016_3_6. [in Ukrainian].*
8. *Hrebin, V.V. (2010). Modern water regime of rivers of Ukraine (landscape-hydrological analysis): monograph Kyiv: Nika-Center. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/glghge_2015_2_4 [in Ukrainian].*
9. *Hrebin, V.V., Khilchevsky, V.K., Stashuk, V.A., Chunaryov, O.V., Yaroshevich, O.E. (Compilers). (2014). Water Fund of Ukraine: Artificial Reservoirs and Ponds: Handbook. Kyiv: "Interpress". [in Ukrainian].*
10. *Hrebin, V.V., Khilchevsky, V.K., Babiy, P.O., Zabokrytska, M.R. (2015). Assessment of the river network of the Rosi basin by river typology according to the Water Framework Directive of the European Union. Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology, 2 (37), 23–33. [in Ukrainian].*
11. *Hudzevych, A.V. (2025). Hydronyms of Vinnytsia: history and present formation. Local history: scientific journal. Kyiv, (1), 80–92. http://kraieznavstvo.history.org.ua/doc/kraeznavstvo_2025_1_10 [in Ukrainian].*
12. *Hudzevych, A.V.(2024). Hydronymy of the Orikhovatka River catchment (Ros River basin) as a source of identification of the area. Historical and geographical research in Ukraine, (18), 33-55. URL: http://resource.history.org.ua/publ/Igdu_2024_18_4 [in Ukrainian].*
13. *Hudzevych, A.V. (2012). Spatial-temporal organization of modern landscapes: theory and practice. Vinnytsia: Vindruk. [in Ukrainian].*
14. *Map of Vinnytsia 1802. (1802) URL: Карта Вінниці 1802 р_.jpg - Google Диск*
15. *Concept of development of small rivers of Vinnytsia 2035 (2023). Vinnytsia: KP "Institute of Urban Development". [in Ukrainian].*
16. *Kryvulchenko, A.I. (2011). Water bodies of Kirovograd region. Part I. Dictionary of water bodies. Part II. Atlas of the hydrographic network. Classifier of watercourses. Reservoirs: Monograph. Kirovograd: Imeks. [in Ukrainian].*
17. *Otamanovsky, V.D. (1993). Vinnytsia in the XIV–XVII centuries. Historical study. Vinnytsia: "Continent-prim". [in Ukrainian].*
18. *Petrenko, O.S. (1993). On the history of the delimitation of Vinnytsia city lands in the 16th-17th centuries. Vinnytsia, 630. 1363–1993: materials of the I Vinnytsia Scientific-Theoretical Conference. Vinnytsia:19–25. [in Ukrainian].*
19. *Dictionary of Hydronyms of Ukraine (1979). Kyiv: Naukova Dumka. [in Ukrainian].*
20. *Tourist scheme. Vinnytsia (1976). URL: https://unc.ua/uk/auction/vinnica-plan-turisticheskaya-shema-1976-god-ukraina-sssr-107119#lot-gallery-1*
21. *Wuhan, O., Osadcha, N. (2023). Load of biogenic elements and organic substances of the rivers of the Don basin (subbasin of the Siverskyi Donets river). Bulletin of the V.N. Karazin Kharkiv National University. Series "Geology. Geography. Ecology", (59), 320–328. DOI: https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-24 [in Ukrainian].*
22. *Khylchevsky, V.K., Hrebin, V.V., Zabokrytska, M.R. (2016). Assessment of the hydrographic network of the Vistula (Western Bug and San) river basin district in Ukraine according to the typology of the EU Water Framework Directive. Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology, 1 (40), 32–44. [in Ukrainian].*
23. *Khilchevsky, V.K., Hrebin, V.V. (2017). Hydrographic and water management zoning of the territory of Ukraine, approved in 2016 – implementation of the provisions of the EU WFD. Hydrology, hydrochemistry and hydroecology, (44), 8-20. [in Ukrainian].*
24. *Huang, B., Yin. X., Menne. M. J., Vose. R., Zhang. H. (2025). NOAA Global Surface Temperature Dataset (NOAAGlobalTemp), Version 6.0.0. NOAA National Centers for Environmental Information. DOI: https://doi.org/10.25921/rzxg-p717.*
25. *Hudzevich. A., Matviichuk. O., Korobkova. H., Hudzevich. L., Bronnikova. L. (2023). Degradation risks and prospects for valley and river landscapes conservation in east Podilsk Transnistria (on the example of the Nemiya river). Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series «Geology. Geography. Ecology», (58), 321–335. DOI: https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-24*
26. *Hudzevych, A.V., Nikitchenko, L.O., Hudzevych, L.S., Bronnikova, L.F., Demets, R.O. (2021). Approaches to organize the econetwork of the Transnistria region in the conditions of urban landscape. Journal of Geology Geography And Geoecology, 30 (3), 449–459. DOI: https://doi.org/10.15421/112141*
27. *Matviichuk O., Hudzevich A., Shevchuk O., Korobkova H. et al. (2024) Biodiversity centers of fauna in the urbanized landscape of Eastern Podillia: taxonomic richness and conservation prospects. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series «Geology. Geography. Ecology», (58), 379–388. DOI: https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-28*
28. *Rybalova, O., Malovanyy, M., Bondarenko, O., Proskurnin, O., Belokon, K. & Korobkova, H. (2022). Method of Assessing the Potential Risk to the Health of the Population During Recreational Water Withdrawal. Journal of Ecological Engineering, 23(5), 81–91. DOI: https://doi.org/10.12911/22998993/146998*
29. *Seelen, L.M.S., Flaim, G., Jennings, E., De Senerpont Domis, L.N. (2019). Saving water for the future: Public awareness of water usage and water quality. Journal of Environmental Management, (242), 246–257. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.047*
30. *Stadtplan Winniza (1943). URL: https://depo.vn.ua/sites/default/files/u1/vinitca_german_.jpg*

31. *State of the Global Climate 2024 (2025). WMO, (1368). Geneva. URL: https://library.wmo.int/idurl/4/69455*
32. *Tsaryk, L.P., Kovalchuk, I.P., Tsaryk, P.L., Zhdaniuk, B.S., Kuzyk, I. R. (2020). Basin systems of small rivers of Western Podillya: state, change tendencies, perspectives of nature management and nature protection optimization. Journ. Geol. Geograph. Geoecology, 29(3), 606–620. DOI: https://doi.org/10.15421/112055*
33. *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development: draft resolution referred to the United Nations summit for the adoption of the post-2015 development agenda by the General Assembly at its 69th session (2015). URL: https://digitallibrary.un.org/record/803352?v=pdf&ln=es*

Гідромережа селитеба у контексті реалізації Євросоюзних природоохоронних стратегій

Анатолій Гудзевич [1]
д. геогр. н., професор, кафедра географії,
[1] Вінницький державний педагогічний університет
імені Михайла Коцюбинського, Вінниця, Україна;
Ганна Коробкова [2]
к. геогр. н., доцент,
кафедра екології та біотехнологій в рослинництві
[2] Державний біотехнологічний університет, Харків, Україна;
Наталія Баюрко [1]
к. пед. н., доцент, кафедра біології;
Марина Шмагельська [3]
к. геогр. н., доцент,
кафедра гуманітарних, економічних та фінансово-облікових дисциплін,
[3] Вінницький кооперативний інститут, Вінниця, Україна

У статті розглядається нагальна проблема з'ясування реального екостану та структурної організації басейну Південного Бугу, функціонуючого в умовах міського середовища. Її постановка викликана потребою узгодження Водного Кодексу України з Водної рамковою директивою (ВРД) ЄС та цілями сталого розвитку ООН. Дослідження зосереджено на інвентаризації водотоків басейну Південного Бугу у межах м. Вінниці за водозбірною площею. На підставі картометричного аналізу і маршрутних обстежень було встановлено: основні види, морфометричні параметри та територіальне поширення водотоків, характер їх стокових можливостей, а також здійснено оцінку елементів гідрологічного режиму та морфометричних особливостей в розрізі басейнів кожного з них. Окрім того, оцінювання сучасної ситуації річок міста дозволило: визначити структурно-функціональний та екологічний стан долинно-річкових комплексів; виявити техногенні порушення окремих з них та значну трансформацію вихідного природного долинно-річкового ландшафту, що склалися в процесі містобудівного освоєння території. У силу вразливості водотоки Вінниці потребують дбайливого відношення, що передбачає відмову від засипання долин при господарському облаштуванні території і, натомість: використання габіонів, створенням насаджень деревно-чагарникової рослинності та якнайширшого включення до природоохоронного середовища у якості ландшафтних заказників і гідрологічних пам'яток природи. Визначення структури водотоків міського селитебу Вінниця, в розрізі водозбірних басейнів, сприяє імплементації положень ВРД ЄС та ЦСР ООН у практику управління водними ресурсами на локальному рівні шляхом інтегрування глобальних і національних цілей у свою місцеву стратегію, забезпечуючи комплексне управління розвитком. Результати вивчення долинно-річкових ландшафтів вказують на значний природоохоронний і туристсько-рекреаційний потенціал водних ресурсів міського середовища та є основою для збалансованого розвитку й ефективного управління територіальними ресурсами Вінниці. Проведені дослідження є базою для подальшого аналізу гідрографічної мережі та сприяють розробці рекомендацій для ефективного використання водних ресурсів на шляху підвищення стійкості громад та інтеграції до європейського простору.

Ключові слова*: сталий розвиток, водотік, струмок, мала річка, гідрографічна мережа, водозбірний басейн, долинно-річковий ландшафт, селитеб, місто Вінниця.*

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу
Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 20 червня 2025 р.
Прийнята 11 серпня 2025 р.

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-42
УДК 556.51:502.51(477)

Надійшла 21 серпня 2025 р.
Прийнята 17 листопада 2025 р.

Аналіз формування профілів фізико-хімічних показників скиду в контексті дотримання екологічної якості річки-реципієнта

Микола Клименко [1]
д. с.-г. н., професор, завідувач кафедри екології,
технології захисту навколишнього середовища та лісового господарства,
[1] Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне, Україна,
e-mail: m.o.klimenko@nuwm.edu.ua, https://orcid.org/0000-0003-0892-0648;
Людмила Романчук [2]
д. с.-г. н., професор, кафедра екології та природоохоронних технологій,
[2] Державний університет «Житомирська політехніка», Житомир, Україна,
e-mail: ludmilaromanchuck14@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-4790-8414;
Ольга Бєдункова [1]
д. біол. н., професор, кафедра екології,
технології захисту навколишнього середовища та лісового господарства,
e-mail: o.o.biedunkova@nuwm.edu.ua, https://orcid.org/0000-0003-4356-4124;
Наталія Вознюк [1]
к. с.-г. н., професор, кафедра екології,
технології захисту навколишнього середовища та лісового господарства,
e-mail: n.m.voznyuk@nuwm.edu.ua, https://orcid.org/0000-0001-9947-4027;
Олена Ліхо [1]
к. с.-г. н., доцент, професор кафедри екології,
технології захисту навколишнього середовища та лісового господарства,
e-mail: o.a.liho@nuwm.edu.ua, https://orcid.org/0000-0001-5991-5035

Скиди зворотних вод оборотних систем охолодження атомних електростанцій можуть змінювати фізико-хімічний стан річок-реципієнтів і впливати на екологічну стабільність водотоків. У роботі проведено щотижневий моніторинг якості додаткової, зворотної охолоджуючої води Рівненської АЕС та води річки Стир до та після скиду зворотної води упродовж 2023 року з метою оцінки впливу техногенного навантаження. Досліджено 17 фізико-хімічних показників, порівняних із експлуатаційними нормами, допустимими концентраціями та екологічними нормативами ГДК. Визначено фонові концентрації до зони впливу РАЕС, що дозволило розмежувати природну та антропогенну складові варіацій. Для статистичної обробки даних застосовано методи аналізу головних компонент (PCA), кореляційний, кластерний та регресійний аналіз. З'ясовано, що всі показники якості зворотної води перебувають у межах нормативних значень, а показники якості води річки Стир на ділянках до та після скиду зворотної води РАЕС демонструють загальну відповідність більшості параметрів екологічним нормативам. Водночас зафіксовано випадки перевищення: рівень pH досягав 8,66 од., що перевищує верхню межу нормативу 8,5 од.; значення ХСК сягало 83,2 мгО/дм³ при ГДК 50 мгО/дм³; концентрація PO_4^{3-} до 0,798 мг/дм³ (ГДК 0,7 мг/дм³); $N–NH_3$ до 2,13 мг/дм³ (ГДК 0,5 мг/дм³); $БСК_5$ до 3,87 мгO_2/дм³ (ГДК 3,0 мгO_2/дм³). Такі перевищення свідчать про періодичні проблеми з органічним і трофічним навантаженням. Показано, що перші три головні компоненти пояснюють 66,9% варіацій, основними чинниками яких є температура та іонний склад (SO_4^{2-}, NO_3^-, Na^+, K^+). Найбільш значний вплив скидів на якість води річки Стир спостерігається для сульфат-, нітрат- та амоній-іонів ($R^2 > 0,7$), тоді як інші показники перебувають у межах природного фону. За інтегральними індексами (IC = 1,25; ITC = 3,25; OPI = 0,15; EI = 0,08; NPI = 1,56) якість води річки оцінено як добру, без ознак евтрофікації та з низьким рівнем органічного навантаження. Отримані результати підтверджують відносно стабільний екологічний стан річки Стир і підкреслюють необхідність систематичного профілактичного моніторингу з урахуванням фонових умов.

Ключові слова*: екологічна безпека, водний скид, зворотна вода, регресійні залежності, аналіз головних компонентів, кластерний аналіз, індекси якості води, показники якості води, екологічні нормативи.*

Як цитувати: Клименко Микола, Романчук Людмила, Бєдункова Ольга, Вознюк Наталія, Ліхо Олена (2025). Аналіз формування профілів фізико-хімічних показників скиду в контексті дотримання екологічної якості річки-реципієнта. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*, (63), 566-579. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-42

In cites: Klymenko Mykola, Romanchuk Liudmyla, Biedunkova Olha, Vozniuk Nataliia, Olena Likho (2025). An analysis of the formation of profiles of physical and chemical indicators discharge in the context of compliance with the environmental quality of the recipient river. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 566-579. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-42 [in Ukrainian]

Вступ. Вода є критичним ресурсом у функціонуванні атомних електростанцій (АЕС), зокрема в оборотних системах охолодження (ОСО), які забезпечують ефективне відведення тепла та стабільність технологічних процесів [1, 2]. У процесі експлуатації ОСО формується зворотна вода, що скидається у природні водні об'єкти [3]. Такий скид містить концентровані компоненти

© Клименко Микола, Романчук Людмила, Бєдункова Ольга, Вознюк Наталія, Ліхо Олена, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

сольового складу, біогенні та органічні речовини, які можуть змінювати гідрохімічний режим річок-приймачів [4-6]. Поряд із точковим впливом водоскидів електростанцій, на якість поверхневих вод діє багатофакторне навантаження, включаючи сільськогосподарські стоки, міські каналізаційні системи, атмосферні випадіння та кліматичні коливання, що ускладнює відокремлення технологічного внеску від природних чи дифузних джерел. Відповідними документами що регулюють вплив водних скидів на навколишнє середовище є Водний кодекс України (ВКУ) [7] та Водна рамкова директива (ВДР) [8]. Екологічний стандарт якості води регламентується ВРД та визначається для окремої забруднюючої речовини. ВКУ встановлює аналог екологічного стандарту якості - гранично допустиму концентрацію (ГДК) речовини у воді, за якої визначається придатність води для конкретних цілей водокористування. Обмеження скиду речовин з урахуванням їх складу і властивостей здійснюється шляхом встановлення гранично допустимого скиду забруднюючих речовин зі зворотними водами, що з екологічних позицій є максимально допустимою нормою для водного об'єкта [9, 10]. Для кожної забруднюючої речовини, скидання якої нормується, за умовами дозволу на спеціальне водне користування встановлюється допустимі концентрації в зворотній воді [11].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Традиційний екологічний контроль фізико-хімічних показників якості ґрунтується на порівнянні виміряних показників із нормативними значеннями (експлуатаційними нормами, допустимими концентраціями, та ГДК). Проте такий підхід часто не дозволяє комплексно оцінити взаємозв'язки між показниками, визначити провідні фактори їх варіацій та простежити багатовимірні закономірності формування якості води. З огляду на складність природних і антропогенних процесів, що впливають на гідросферу, застосування сучасних статистичних методів (кореляційного аналізу, аналізу головних компонент (РСА), кластеризації, регресійного аналізу) є необхідним для системного вивчення просторово-часових закономірностей та інтегральної оцінки стану водних об'єктів. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю наукового обґрунтування екологічної безпеки водних об'єктів при впливі водних скидів атомних електростанцій. В умовах зростання техногенного навантаження важливо не лише контролювати відповідність фізико-хімічних показників нормативам, але й кількісно оцінювати внесок зворотних вод у формування якості річкових екосистем. Це дозволяє забезпечити не лише констатувати відповідність чи перевищення ГДК, але й з'ясувати природу варіацій, ступінь технологічного внеску та роль природних процесів у формуванні якості води, що має безпосереднє значення для забезпечення екологічної безпеки та сталого використання водних ресурсів. Наукова новизна роботи полягає у поєднанні класичного нормативного підходу з багатовимірними статистичними методами (РСА, кластерний, регресійний аналіз) для визначення ключових чинників варіацій та кількісної оцінки технологічного внеску скидів у якість річки Стир.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є комплексна оцінка формування та варіацій фізико-хімічних показників якості технологічних та природних вод при скидів зворотної води Рівненської АЕС (РАЕС) із застосуванням багатофакторних статистичних методів для визначення ключових факторів змін та забезпечення відповідності екологічним нормативам.

Завданнями дослідження є:

1. Провести моніторинг фізико-хімічних показників додаткової, зворотної охолоджуючої води РАЕС та води річки Стир упродовж 2023 року;
2. Порівняти отримані результати з експлуатаційними нормами, допустимими концентраціями та екологічними ГДК;
3. Застосувати метод РСА для виявлення провідних факторів варіації та групування змінних;
4. Виконати кореляційний аналіз для встановлення взаємозв'язків між основними показниками якості вод;
5. Виконати кластерний аналіз (КА) для класифікації фізико-хімічних показників за їх поведінкою при переході від технологічних до річкових вод та прослідити вплив скиду зворотної води на формування концентрацій у річці Стир за допомогою регресійних залежностей;
6. Визначити фонові концентрації основних фізико-хімічних показників у річці Стир до зони впливу скиду зворотної води РАЕС для використання у порівняльному аналізі;
7. Визначити категорії якості води річки Стир за інтегральними індексами якості води;
8. Надати науково обґрунтовані висновки щодо екологічної безпеки та необхідності моніторингу скидів зворотної води.

Методи і методики проведення дослідження. *Об'єктом дослідження* є технологічні води ОСО РАЕС, що використовуються у виробничих процесах електростанції, а також поверхневі води річки Стир на до та ОСО. *Предметом дослідження* є фізико-хімічні показники якості додаткової та зворотної охолоджуючої води ОСО РАЕС та їхній вплив на екологічний стан річки

Стир. РАЕС експлуатує чотири енергоблоки типу ВВЕР загальною потужністю 2835 МВт. Забір та скид води здійснюється з річки Стир, яка є притокою р. Прип'ять, має довжину 494 км та площу басейну 13 100 км² [12]. Водопідготовка додаткової води здійснюється на очисних спорудах і включає освітлення шляхом вапнування, стабілізаційну обробку сірчаною кислотою та використання оксіетилідендифосфонової кислоти [13]. Підготовлена додаткова вода подається до ОСО, використовується для охолодження конденсаторів турбін та іншого обладнання, після чого у вигляді зворотної води без попереднього очищення відводиться до річки Стир.

Відбір проб і програма моніторингу включала виконання щотижневих вимірювань 17 фізико-хімічних показників pH, температура води (Т), сухий залишок (СЗ), загальна лужність (ЗЛ) та твердість (ЗТ), концентрація хлорид-іонів (Cl^-), сульфат-іонів (SO_4^{2-}), фосфат-іонів (PO_4^{3-}), іонів натрію (Na^+) та калію (K^+), нітрат- (NO_3^-) та нітрит (NO_2^-) - іонів, азоту амонійного ($N\text{-}NH_3$), завислих речовин (ЗР), розчиненого кисню (РК), хімічного споживання кисню (ХСК), біохімічного споживання кисню за 5 діб ($БСК_5$). Вимірювання фізико-хімічних показників якості води здійснювали за стандартними методиками. Т визначали за допомогою термометра, pH вимірювали електрохімічним методом із застосуванням pH-метра. ЗЛ та ЗТ визначали титрометричними методами, концентрацію Cl^- та SO_4^{2-} встановлювали осаджуваним методом з використанням розчинів солей срібла та барію відповідно. Вміст РК визначали методом Вінклера, ХСК – перманганатометричним методом, а $БСК_5$ – йодометричним методом. Концентрацію Na^+ та K^+ визначали методом полум'яної фотометрії, тоді як $N\text{-}NH_3$, NO_3^-, NO_2^- та PO_4^{3-} встановлювали фотометричним методом. ЗР визначали гравіметричним методом, а СЗ – після випарювання проби з подальшим висушуванням залишку Відбір проб та вимірювання фізико-хімічних показників здійснювалися вимірювальною лабораторією РАЕС (свідоцтва про визнання вимірювальних можливостей №R-8/8-48-6 від 02.11.23 р. чинне до 02.11.28 р., № R-8/8-48-6/1 від 22.01.2024 р. чинне до 02.11.2028 р.), з використанням вимірювальних приладів, які пройшли перевірку в сфері Державного метрологічного нагляду України. Отримано дозвіл РАЕС на публікацію даних контролю у відкритих джерелах (Акт Рівненської АЕС № 036-08 –А-Заг.В від 02.03.2023 р.). Порівняння отриманих результатів проводили з експлуатаційними нормами для додаткової води [14], допустимими концентраціями для зворотної води [11] та екологічними нормативами ГДК для річкової води [15-17], що наведені у таблиці 1. Більш того, було проаналізована динаміка змін концентрацій фізико-хімічних показників контрольної ділянку річки Стир до скиду зворотної води РАЕС як фонової. Це дозволило оцінити природний рівень фізико-хімічних показників і порівняти його з умовами після скиду. Для оцінки якості води застосовували індекс сольового складу (ІС) та індекс трофосапробіологічного стану (ІТС) [18,19]. Крім того, були використані індекси якості: Nutrient Pollution Index (NPI) для оцінки забруднення біогенними елементами [20], Eutrophication Index (EI) для визначення трофічного статусу [21] та Organic Pollution Index (OPI) для оцінки органічного навантаження [22].

Статистична обробка результатів вимірювань включала визначення мінімуму - максимуму (min-max), середнього арифметичного значення (M), стандартного відхилення (±SD). Крім того проведений кореляційний аналіз з розрахунком коефіцієнтів Пірсона (r), КА профілів концентрацій «додаткова – зворотна – річкова вода», а також аналіз головних компонент (РСА) для виявлення головних факторів варіацій. Кореляційний аналіз, КА та РСА проводили відповідно рекомендацій [23]. Силу лінійного зв'язку між змінними визначали за значенням r, з наступною градацією: в діапазоні $0{,}1 \le r \le 0{,}1$ – зв'язок між змінними дуже слабкий або відсутній; r у діапазоні від 0,3 до 0,5 або від -0,3 до -0,5 – помірна позитивна або негативна кореляція відповідно; r у діапазоні від 0,5 до 0,7 або від -0,5 до -0,7 – середня позитивна або негативна кореляція відповідно; r у діапазоні від 0,7 до 1,0 або від -0,7 до -1,0 – сильна позитивна або негативна кореляція відповідно. КА був застосована до профілів концентрацій кожного параметра в додатковій, зворотній та води річки Стир, для цього кожний параметр було нормалізовано по профілю за відносним підвищенням або зниженням значення серед «додаткової - зворотної - річкової» вод. Вплив зворотної води на формування концентрацій у річці оцінювали за допомогою регресійних моделей із розрахунком коефіцієнта детермінації (R^2), що дозволяло кількісно визначити частку поясненої дисперсії фізико-хімічних показників. Для трактування значень R^2 використовували наступну градацію: значення $R^2 > 0{,}7$ свідчать про суттєвий вплив скидів на річкові концентрації; значення $R^2 = 0{,}3–0{,}7$ означають частковий, але статистично помітний зв'язок; значення $R^2 < 0{,}3$ вказують, що роль зворотної води у формуванні річкових концентрацій для цього показника обмежена, і основний внесок ймовірно здійснюють інші джерела чи процеси. Усі розрахунки виконували з використанням програмного пакета JASP v.0.14.3.

Таблиця 1 / Table 1

Екологічні нормативи та експлуатаційні значення фізико-хімічних показників якості / Environmental standards and operational values of quality physical and chemical indicators

Параметр	Експлуатаційна норма для додаткової води ОСО [14]	Допустима концентрація в зворотній воді [11]	ГДК води р. Стир
pH, од.	6,0 - 10,3	6,5 - 9,0	6,5 - 8,5 [17]
Т, °С	не нормується	збільшення не більше 3	не більше 28
СЗ, мг/дм^3	не більше 415	не більше 1000	не більше 1000 [17]
ЗЛ, мг-екв/дм^3	не більше 2,5	не нормується	0,5 - 6,5
Cl^-, мг/дм^3	не більше 50	не більше 122,5	не більше 300 [17]
SO_4^{2-}, мг/дм^3	не більше 100	не більше 418,2	не більше 100 [17]
ЗТ, мг-екв/дм^3	не більше 4,0	не нормується	1,5-7,0 [16]
ХСК, мгО/дм^3	не нормується	не більше 80,62	не більше 50 [15]
PO_4^{3-}, мг/дм^3	не більше 1,0	не більше 0,7	не більше 0,7 [15]
NO_3^-, мг/дм^3	не більше 15	не більше 22	не більше 45 [17]
ЗР, мг/дм^3	не більше 10	не більше 14,88	не більше 25 [15]
Na^+, мг/дм^3	не нормується	не нормується	не більше 10 [16]
K^+, мг/дм^3	не нормується	не нормується	не більше 120 [16]
N-NH_3, мг/дм^3	не нормується	не більше 0,835	не більше 0,5 [15]
NO_2^-, мг/дм^3	не більше 5,0	не більше 0,10	не більше 3,3 [17]
РК, мгO_2/дм^3	не нормується	більше 4,0	більше 4,0 [17]
$БСК_5$, мгO_2/дм^3	не нормується	не більше 3,0	не більше 3,0 [15, 17]

Результати дослідження. Фізико-хімічні показники додаткової, зворотної води ОСО та води річки Стир. Показники якості додаткової води ОСО за 2023 рік демонструють певну варіативність (рис. 1а). Загалом якість додаткової води ОСО за більшістю значень фізико-хімічних показників контролю відповідає експлуатаційним нормам (табл. 1). ЗТ варіювалася в межах 1,5–4,32 мг-екв/дм^3 із середнім значенням (M=2,23 мг-екв/дм^3), хоча мінімальні та середні значення відповідають нормам, максимальне значення перевищує допустимий рівень. Концентрація ЗР становила 10,42–35,78 мг/дм^3 із середнім значенням (M=26,54 мг/дм^3), що перевищує допустимий рівень. Для інших фізико-хімічних показників відхилення значень від експлуатаційна норма для додаткової води ОСО не фіксувалось.

Дослідження фізико-хімічних показників якості зворотної води ОСО за 2023 рік демонструє стабільність параметрів із певною варіативністю (рис. 1б). Всі показники якості зворотної води ОСО перебувають у межах нормативних значень (табл. 1). Дослідження якості води річки Стир за 2023 рік демонструє загальну відповідність більшості параметрів екологічним нормативам (рис. 1в).

Аналіз головних компонент (РСА). Початкові змінні концентрацій фізико-хімічних показників якості досліджуваних вод при проведенні РСА булі трансформовані у нові незалежні осі – головні компоненти (PC1, PC2, PC3), та впорядковані за величиною внеску у загальну дисперсію даних (рис. 2). Перші три компоненти сумарно пояснюють 66,9% варіативності: PC1 = 39,2%, PC2 = 18,6%, PC3 = 9,1%. PC1 отримала високе навантаження на температуру, та мінеральні компоненти, зокрема концентрації Cl^-, SO_4^{2-}, NO_3^-, Na^+ та K^+. PC2 – сильно пов'язаний із показниками pH та ЗТ, ЗЛ, а також зворотнім компонентом концентрацією РК. PC2 вказує на відмінності у хімічному складі води: наприклад, зворотна вода має найвищі значення PC2, а річкова - найнижчі. PC3 - значною мірою визначається вмістом SO_4^{2-} і в меншій мірі $БСК_5$.

Кореляційний аналіз. Для оцінки взаємозв'язків між фізико-хімічними показниками якості було проведено кореляційний аналіз із використанням матриць коефіцієнтів кореляції Пірсона для додаткової води, зворотної води та води річки Стир (рис. 3). Матриця рангової кореляції r для додаткової води (рис. 3а) виявила низку помірних позитивних та негативних кореляцій. Так, позитивні кореляції між pH і $N–NH_3$, а також між температурою води з PO_4^{3-} і NO_3^- вказують на важливу роль кислотно-лужної рівноваги та температурного режиму у формуванні вмісту поживних речовин ($N–NH_3$, PO_4^{3-} і NO_3^-). Натомість помірні негативні зв'язки виявлено

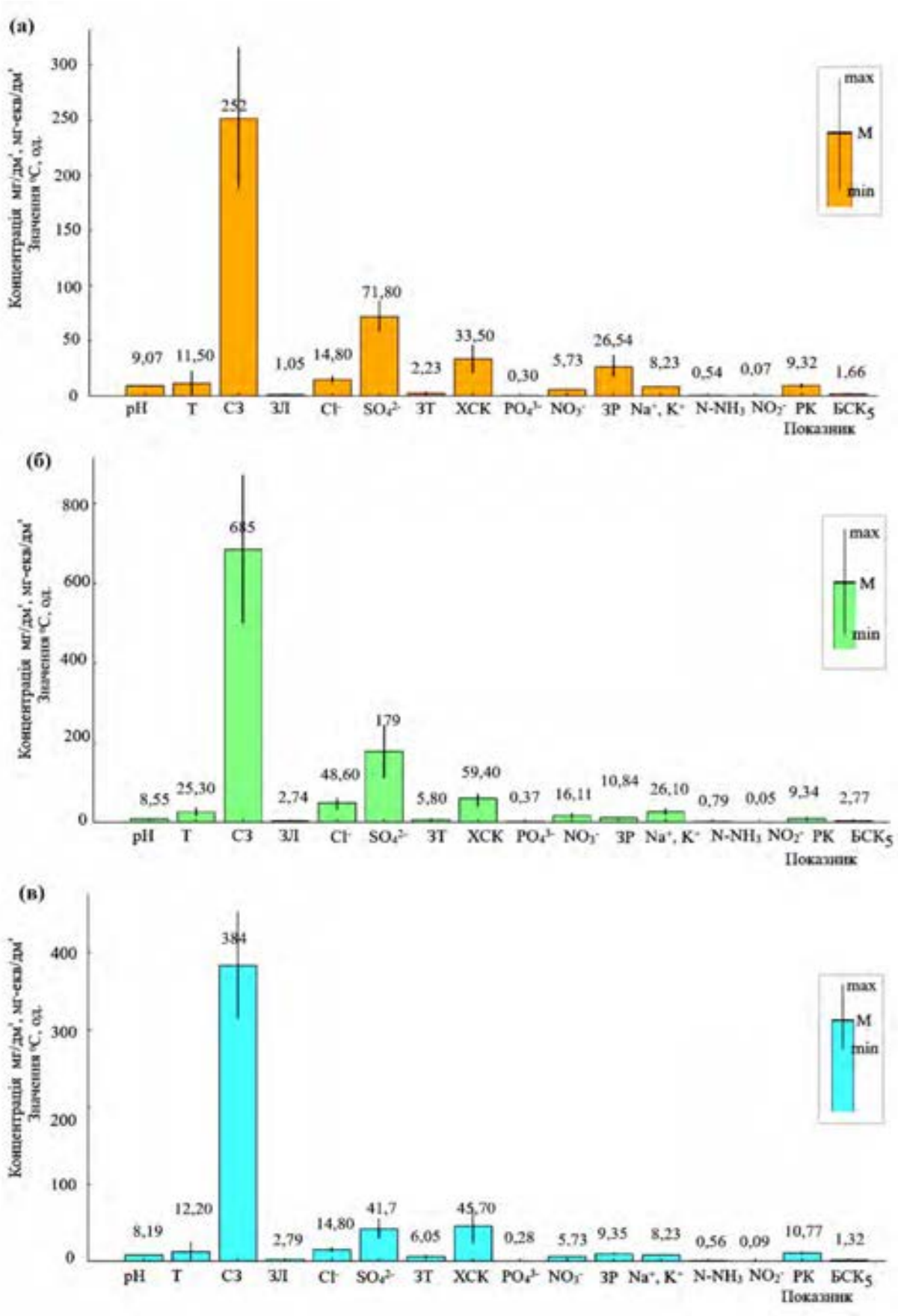


Рис. 1. Динаміка фізико-хімічних показників якості додаткової води (а), зворотної води (б), води річки Стир (в) /
Fig. 1. Dynamics of quality indicators for additional water (a), return water (б), and water from the Styr River (в)

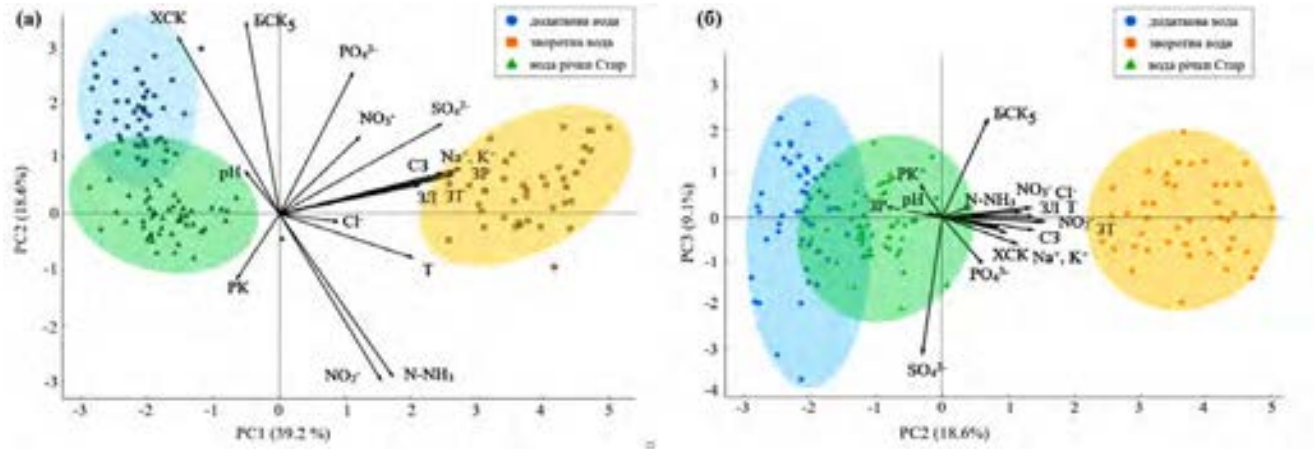


Рис. 2. Результати PCA для фізико-хімічних показників якості досліджуваних вод для PC1 та PC2 (а), PC2 та PC3 (б) / Fig. 2. PCA results for water quality indicators for PC1 and PC2 (a), PC2 and PC3 (b)

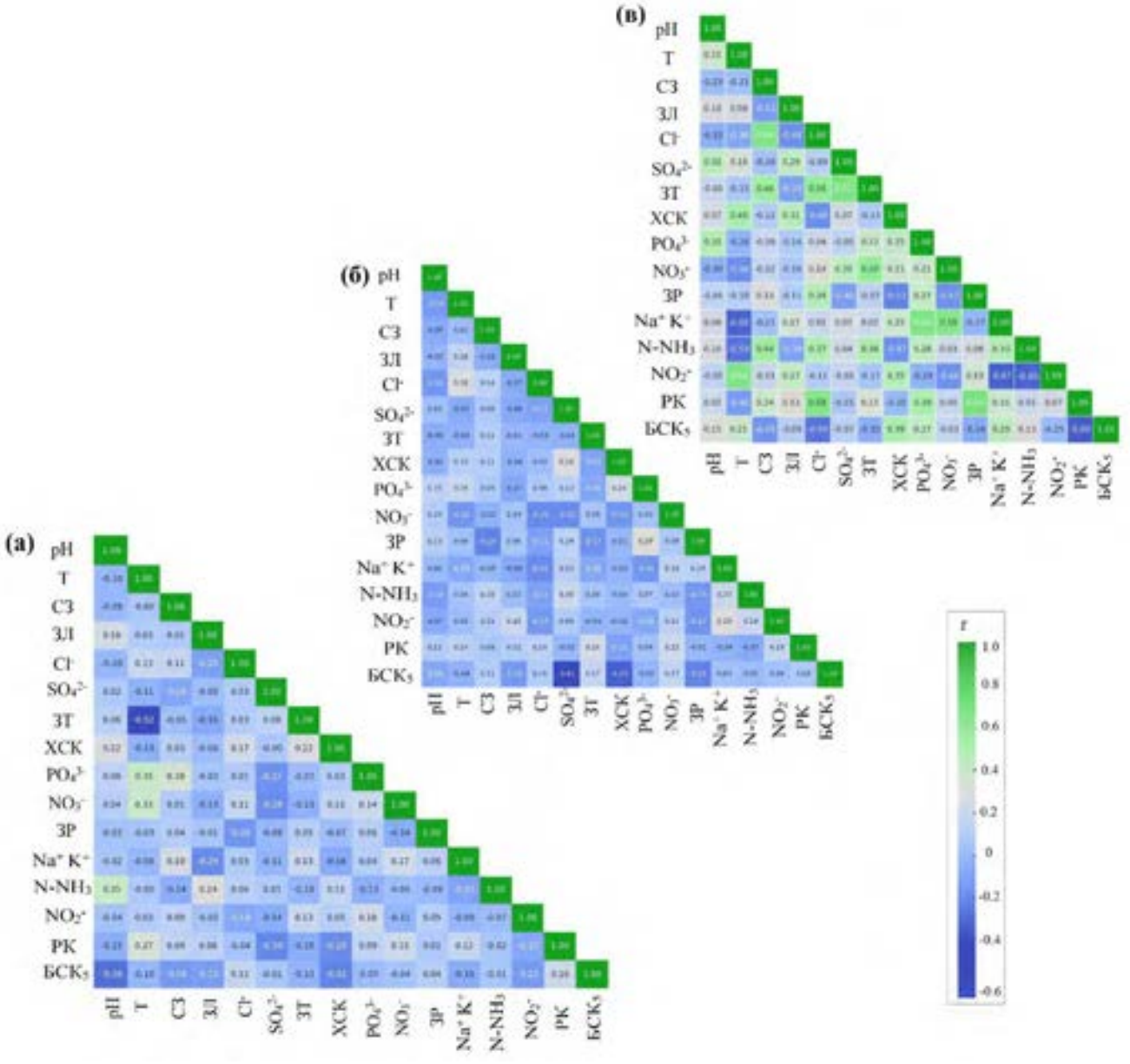


Рис. 3. Матриця коефіцієнтів рангової кореляції Пірсона для фізико-хімічних показників якості додаткової води (а), зворотної води (б), води річки Стир (в) / Fig. 3. Matrix of Pearson's rank correlation coefficients for the quality indicators of additional water (a), return water (б), and water from the Styr River (в)

між SO_4^{2-} та РК, температурою води і $БСК_5$, а також температурою та ЗТ. У зворотній воді (рис. 3б) кореляційний аналіз виявив переважно негативні залежності. Зокрема, ХСК виявляє негативний помірний зв'язок із $БСК_5$, що свідчить про домінування у складі води органічних сполук, стійких до біологічного розкладу. Кореляційний аналіз для води річки Стир (рис. 3в) виявив значущі як позитивні, так і негативні залежності. Зафіксована сильна позитивна кореляція між температурою та NO_3^-, що може бути наслідком інтенсифікації нітрифікаційних процесів у теплий період, також між Cl^- і РК. Помірні позитивні зв'язки між pH та SO_4^{2-}, а також між ХСК і температурою вказують на залежність розчинності органічних та мінеральних сполук від гідрохімічних умов (температури та кислотності). Натомість негативні зв'язки проявляються між температурою та $N–NH_3$, Na^+ і K^+, між $БСК_5$ і Cl^-, та між ХСК і ЗР.

Кластерний аналіз (КА) і регресійні залежності. КА профілів концентрацій фізико-хімічних показників підтвердив різнорідний характер формування іх профелів під час переходу від додаткової води через технологічну схему ОСО до річкової точки контролю річки Стир (рис. 4). За результатами кластеризації було виділено три основні групи параметрів. Кластер 1 об'єднує фізико-хімічні показники ХСК та SO_4^{2-}, для яких спостерігалося суттєве зростання концентрацій у зворотній воді порівняно з додатковою та річковою. Це свідчить про їхню залежність від процесів водопідготовки та концентраційних ефектів в оборотній системі охолодження. Кластер 2 включає поживні речовини (PO_4^{3-}, $N–NH_3$, NO_3^-), які демонструють виразні зміни у зворотних водах і відображають прямий вплив скидів на гідрохімічний стан річки. Кластер 3 охоплює параметри зі складнішою або менш вираженою поведінкою. Вони частково зазнають біологічної трансформації, можуть мати локальні джерела надходження або залежати від процесів седиментації, що зумовлює відмінності їхніх профілів від попередніх кластерів. Для фізико-хімічних показників кластерів 1 та 2 розраховані регресійні моделі, що описують залежність між концентраціями у зворотній та річковій воді (рис. 5а–г). Найбільш чіткі лінійні зв'язки встановлено для SO_4^{2-} та NO_3^-, для яких R^2 перевищує 0,7. Це означає, що варіації їхніх концентрацій у річковій воді значною мірою зумовлені впливом скидів.

Інтегральні індекси якості води. За індексом сольового складу (I_C = 1,25), якість води річки Стир на ділянках до та за скидом зворотної води РАЕС залишається на високому рівні, що свідчить про відсутність значного антропогенного навантаження солей (рис. 6а) та стан води характеризується як відмінний, ступень чистоти - дуже чистий. Індекс трофо-сапробіологічного стану (I_{TC} = 3,25) вказує на середній рівень забруднення, стан характеризується як добрий, а ступень чистоти - слабко забруднені (рис. 8а). За специфічними індексами: значення OPI = 0,15 ± 0,05 свідчить про помірне органічне навантаження, та хорошу якість води; значення NPI = 1,56 ± 0,83 не перевищує поріг 3, що вказує середнє забруднення поживними речовинами $N–NO_3^-$ і $P–PO_4^{3-}$; та EI = 0,08 ± 0,38, значення якого не перевищує 1, що свідчить про відсутність евтрофікування (рис. 6б-г).

Обговорення отриманих результатів. Результати дослідження підтверджують, що внесок техногеного впливу може бути нерівномірним за групами фізико-хімічних показників і може проявляється у специфічних закономірностях, пов'язаних із процесами водопідготовки, концентраційними ефектами в ОСО та біохімічними трансформаціями у річковому середовищі. Кластеризація фізико-хімічних показників виявила групу параметрів (SO_4^{2-}, ХСК), що зазнають найбільш

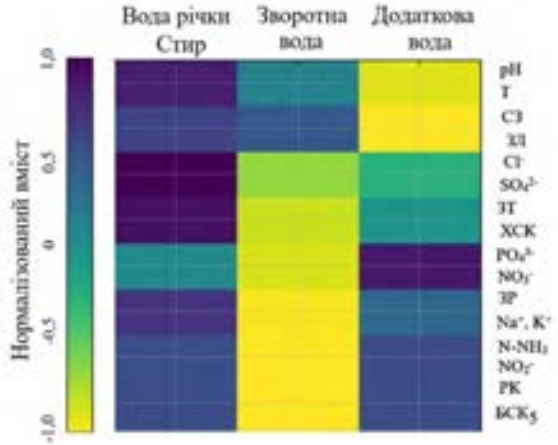


Рис. 4. Кластеризація концентрацій профілів фізико-хімічних показників за їх профілем /
Fig. 4. Clustering of concentrations of profiles of physicochemical indicators according to their profile

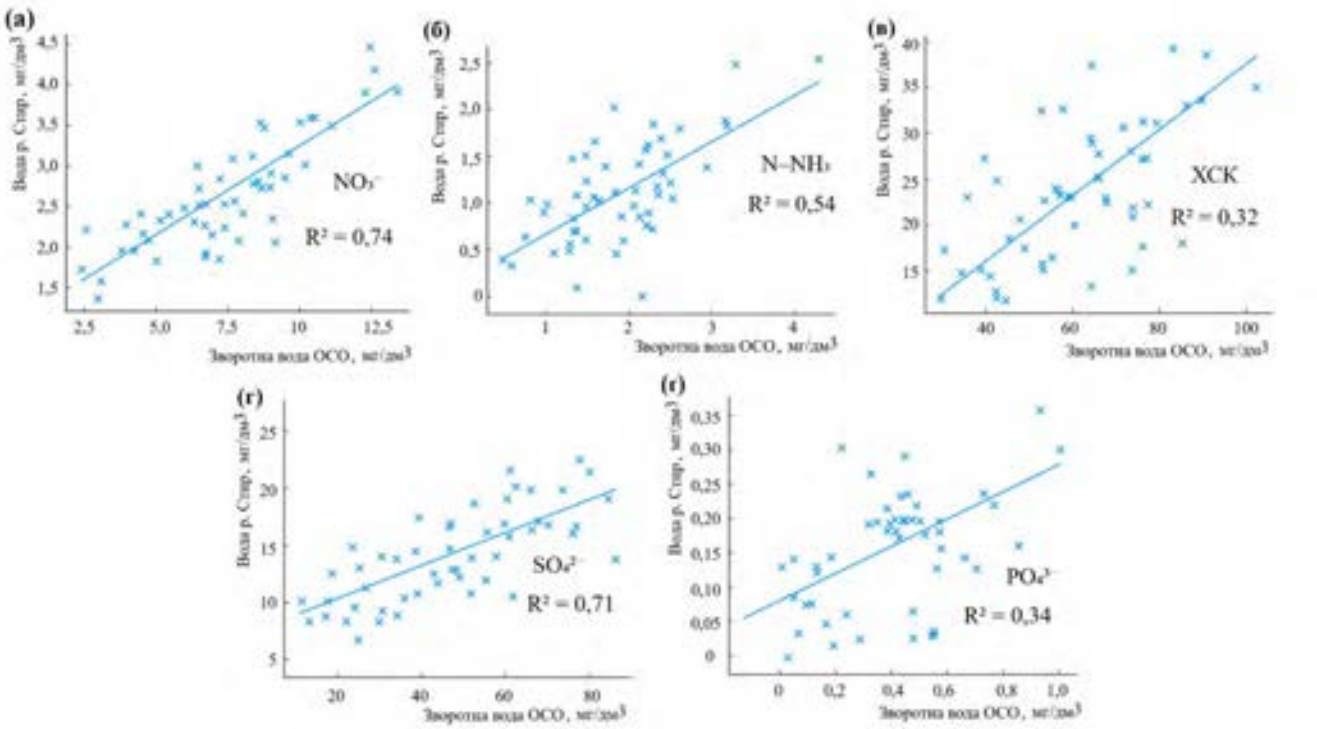


Рис. 5. Регресійні залежності концентрацій фізико-хімічних показників в зворотній воді та воді річки Стир (а - NO_3^-; б - $N–NH_3$; в - ХСК; ґ - SO_4^{2-}; г - PO_4^{3-}) /
Fig. 5. Regression dependencies of concentrations of indicators in return water and water of the Styr River (а - NO_3^-; б - $N–NH_3$; в - ХСК; ґ - SO_4^{2-}; г - PO_4^{3-})

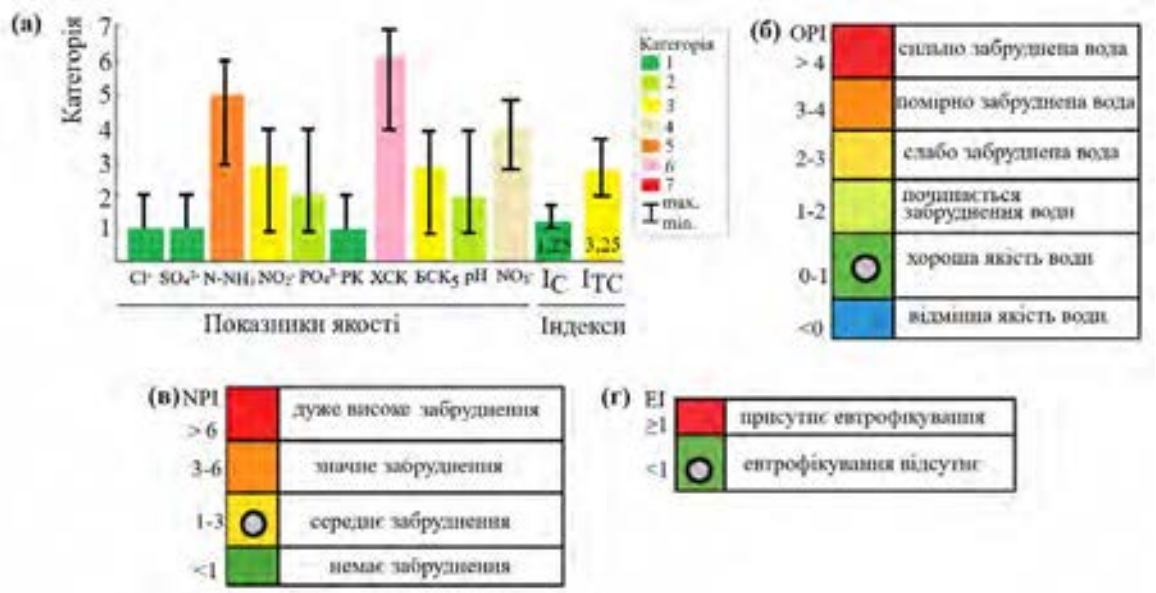


Рис. 6. Категорії якості води річки Стир за індексами I_C та I_{TC} (а), і значення OPI (б), NPI (в), EI (г) та їх інтерпретація / Fig. 6. Water quality categories of the Styr River according to I_C and I_{TC} indices (а), and OPI (б), NPI (в), EI (г) values and their interpretation

виразних змін у зворотних водах і демонструють тісні регресійні зв'язки з річковими концентраціями ($R^2 > 0,7$). Це свідчить про їхнє безпосереднє походження від процесів водопідготовки та концентраційних ефектів ОСО. Подібні закономірності характерні для малотрансформованих речовин, які у водному середовищі є відносно інертними та відображають техногенний внесок [24]. Для показників $N–NH_3$, NO_3^-, PO_4^{3-} характерні помірні значення коефіцієнтів детермінації ($R^2 = 0,3–0,7$), що свідчить про поєднання техногенного і природного впливу. Біохімічні процеси - нітрифікація, денітрифікація, асиміляція та адсорбція на мінеральних частках - модифікують їхній вміст, а сезонні коливання температури води додатково визначають інтенсивність транс-

формацій [25]. Позитивні кореляції між температурою, вмістом біогенних елементів (N, P) і органічними речовинами підтверджують ключову роль термічного режиму в регуляції біохімічних процесів. Водночас негативні зв'язки, зокрема між показниками органічного забруднення (ХСК, $БСК_5$) та мінеральними іонами (SO_4^{2-}, Cl^-), свідчать про різну природу джерел їхнього надходження та конкурентні процеси накопичення органічної і мінеральної складових у річковій екосистемі [26].

Результати нашого дослідження узгоджуються з висновками інших науковців. Зокрема, на Південно-Українській АЕС встановлено, що характеристики системи скиду зворотних вод впливають на забруднення приймаючої водойми за концентрацією міді, що підтверджує значний вплив техногенних факторів на якість води [27]. У випадку Бурштинського водосховища спостерігалися просторові відмінності у показниках якості залежно від місця відбору проб, що також підтверджує складність просторово-часової динаміки впливу антропогенних джерел [28]. Інші дослідження підкреслюють важливість контролю водно-хімічного режиму оборотних систем охолодження електростанцій для забезпечення належної якості води [29]. Застосований РСА підтвердив, що основні відмінності у складі вод формуються групами змінних фізико-хімічних показників, що корелюють між собою та визначають просторово-часову варіацію. Перша головна компонента (РС1, 39,2%) відображає роль температури та іонних компонентів, друга (РС2, 18,6%) - вплив ЗТ, ЗЛ та кисневого режиму, третя (РС3, 9,1%) виділяє SO_4^{2-} і $БСК_5$ як окремі чинники технологічного навантаження [30–31]. Це добре узгоджується з результатами кореляційного аналізу для додаткової, зворотної та річкової вод [32–33].

Більшість параметрів якості води річки Стир на ділянках до та після скиду зворотної води РАЕС (табл. 2) відповідають екологічним нормативам. Водночас зафіксовано випадки перевищення: рівень pH досягав 8,66 од., що перевищує верхню межу нормативу (8,5 од.); значення ХСК сягало 83,2 мгО/дм³ при ГДК 50 мгО/дм³; концентрація PO_4^{3-} до 0,798 мг/дм³ (ГДК 0,7 мг/дм³); $N–NH_3$ до 2,13 мг/дм³ (ГДК 0,5 мг/дм³); $БСК_5$ до 3,87 $мгO_2$/дм³ (ГДК 3,0 $мгO_2$/дм³). Такі перевищення свідчать про періодичні проблеми з органічним і трофічним навантаженням. Проте важливо відзначити, що вони спостерігаються у контрольній фоновій точки до скиду зворотної води РАЕС. Більш того, важливо відмітити, що середні концентрації фізико-хімічних показників річки на обох контрольованих ділянках не перевищують екологічних нормативів. Інтегральні індекси показали, що вода річки Стир на ділянках до та після скиду зворотної води РАЕС відповідає задовільному - доброму класу якості. Вода характеризується високою чистотою за мінеральними компонентами й не перебуває у стані евтрофікації. Це вказує на ефективність природних процесів самоочищення та відносно обмежений вплив техногенних джерел у даному регіоні.

Серед обмежень цього дослідження – фоку-

Таблиця 2 / Table 2

Значення фізико-хімічних показників якості технологічних вод оборотної системи та води річки Стир (2023 р.) / Quality indicators for process water in the recirculation system and water from the Styr River (2023)

Параметр	M ± SD			
	Додаткова вода ОСО	Зворотна вода ОСО	Вода річки Стир	
			До скиду	Після скиду
pH, од.	9,07 ± 0,65	8,55 ± 0,13	8,15 ± 0,20	8,19 ± 0,25
T,°C	11,5 ± 10,6	25,3 ± 9,9	11,4 ± 10,2	12,2 ± 11,2
СЗ, мг/дм³	252 ± 64	685 ± 186	243 ± 88	258 ± 69
ЗЛ, мг-екв/дм³	1,05 ± 0,58	2,74 ± 0,58	2,65 ± 0,52	2,79 ± 0,65
Cl^-, мг/дм³	14,8 ± 2,9	48,6 ± 18,2	14,4 ± 3,0	14,8 ± 2,9
SO_4^{2-}, мг/дм³	71,8 ± 14,4	179 ± 67	38,7 ± 8,5	41,7 ± 12,5
ЗТ, мг-екв/дм³	2,23 ± 1,53	5,80 ± 2,06	6,35 ± 1,54	6,05 ± 1,32
PO_4^{3-}, мг/дм³	0,302 ± 0,185	0,368 ± 0,258	0,097 ± 0,122	0,095 ± 0,135
ХСК, мг/дм³	33,5 ± 12,6	59,4 ± 20,5	43,4 ± 21,3	45,7 ± 22,5
NO_3^-, мг/дм³	5,73 ± 0,38	16,11 ± 5,76	5,66 ± 0,32	5,73 ± 0,38
ЗР, мг/дм³	26,54 ± 9,34	10,84 ± 1,34	9,12 ± 0.91	9,35 ± 1,03
Na^+, K^+, мг/дм³	8,23 ± 0,5	26,1 ± 7,9	8,31 ± 0,52	8,23 ± 0,50
$N\text{-}NH_3$, мг/дм³	0,54 ± 0,05	0,79 ± 0,65	0,53 ± 0,05	0,56 ± 0,05
NO_2^-, мг/дм³	0,067 ± 0,07	0,047 ± 0,023	0,072 ± 0,08	0,069 ± 0,06
РК, $мгO_2$/дм³	10,21 ± 2,38	9,34 ± 1,85	11,31 ± 3,05	10,76 ± 1,55
$БСК_5$, $мгO_2$/дм³	1,66 ± 0,25	1,95 ± 0,35	1,21 ± 0,12	1,32 ± 0,17

сування переважно на фізико-хімічних показниках якості води без урахування біологічних ефектів та можливі відхилення під час екстремальних погодних умов. Подальші дослідження будуть спрямовані на врахування біологічних чинників та порівняння динаміки фізико-хімічних показників якості води річки Стир із іншими річками, що зазнають впливу подібних технологічних процесів. Загалом результати підтверджують необхідність постійного моніторингу та вдосконалення технологій водопідготовки з метою зниження техногенного навантаження й забезпечення екологічної безпеки.

Висновки.

1. Проведений упродовж 2023 року щотижневий моніторинг додаткової, зворотної та річкової вод дозволив виявити просторово-часові закономірності варіювання фізико-хімічних показників якості води. Отриманий масив даних є репрезентативною основою для подальшого кількісного оцінювання технологічного й екологічного стану вод.

2. Фізико-хімічні показники якості додаткової та зворотної води переважно відповідали експлуатаційним нормам і допустимим концентраціям, а вода річки Стир, екологічним нормативам ГДК. Зафіксовані поодинокі перевищення pH, ХСК, $БСК_5$, PO_4^{3-} та $N–NH_3$ мали епізодичний характер і не були безпосередньо пов'язані зі скидом зворотної води, а йомовірно роблять інші джерела, розташовані вище за течією.

3. За результатами PCA три головні компоненти сумарно пояснюють 66,9% варіацій. Перша компонента (PC1=39,2%) відображає вплив температури та іонного складу (Cl^-, SO_4^{2-}, NO_3^-, Na^+, K^+), друга (PC2=18,6%) роль ЗЛ, ЗТ та РК, третя (PC3=9,1%) внесок SO_4^{2-} і $БСК_5$. Це свідчить, що визначальними чинниками формування якості води є температура та компоненти іоного складу.

4. Матриці коефіцієнтів кореляції Пірсона виявили суттєві зв'язки між окремими показниками. Позитивні кореляції між температурою та NO_3^-, а також між pH і $N–NH_3$, вказують на залежність нітрифікаційних процесів від температурного та кислотно-лужного режимів. Негативні зв'язки між ХСК і $БСК_5$ або між SO_4^{2-} і РК відображають різну природу джерел органічних та неорганічних сполук у водному середовищі.

5. Кластеризація фізико-хімічних показників показників дозволила виокремити групи: параметри, що зростають у зворотній воді (SO_4^{2-}, ХСК) та біогенні елементи (PO_4^{3-}, $N–NH_3$, NO_3^-). Чіткі лінійні зв'язки, за результатами регресійного аналізу, у зворотній та річковій воді встановлені для показників SO_4^{2-} та NO_3^-, для яких коефіцієнт детермінації перевищує 0,7.

6. Встановлення контрольних значень у точці до скиду зворотної води РАЕС дало змогу визначити фонові концентрації основних показників. Порівняння з концентраціями фізико-хімічних показників після скиду показало, що найбільш виражений техногенний внесок спостерігається для SO_4^{2-} та РК, тоді як решта параметрів на ділянках річки Стир до та за скидом коливається в межах ±SD.

7. Вода річки Стир на ділянках до та скидом зворотної води РАЕС характеризується високою чистотою за сольовим складом (IC = 1,25), низьким рівнем органічного забруднення (OPI = 0,15) і відсутністю евтрофікації (EI = 0,08). Індекс трофо-сапробіологічного стану (ITC = 3,25) та індекс забруднення біогенними речовинами (NPI = 1,56) відповідають доброму екологічному класу якості.

8. Отримані результати свідчать, що експлуатація ОСО РАЕС не спричиняє суттєвого погіршення екологічного стану річки Стир. Водночас наявність періодичного трофо-органічного навантаження підкреслює необхідність постійного профілактичного моніторингу, з урахуванням фонових і сезонних коливань, для підтримання екологічної стабільності водотоку та сталого управління водними ресурсами.

Список використаних джерел

1. *Biedunkova, O., Kuznietsov, P., Mandryk, O. (2025). Study of the dominant modes of formation and variability of potentially toxic element concentrations and their impact on environmental quality. Chemosphere, 388, 144688. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144688*
2. *Kuznietsov, P., Biedunkova, O. (2025). The role of carbonate equilibrium in scale formation of calcium carbonate in a power plant open recirculating system. Data-Centric Engineering, 6, e13. DOI: https://doi.org/10.1017/dce.2025.9*
3. *Biedunkova, O., Kuznietsov, P., Pinchuk, O. (2025). Comprehensive assessment of scale formation, corrosion, and biological pollution in a cooling water supply system. MethodsX, 14, 103154. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mex.2025.103154*
4. *Abbas, Q., Yaqoob, H., Sajjad, U., Ali, H. M., Jamil, M. M. (2025). Utilization of local coal in Pakistan's oil-fired power plants and future clean technologies for power generation. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 11, 101132. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cscee.2025.101132*
5. *Kurek K, Młyński D, Bugajski P, Nowobilska-Majewska E. (2019). The Impact of Treated Sewage on Water Quality in Mordarka Stream. Journal of Ecological Engineering. 20(1) 39–45. DOI: https://doi.org/10.12911/22998993/93874*

6. Biedunkova, O., Kuznietsov, P. (2025). Integration of water management in the assessment of the impact of heavy metals discharge from the power plant with mitigation strategies. Ecological Indicators, 175, 113618. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113618
7. Водний кодекс України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Text (дата звернення: 16.08.2025)
8. Директива Європейського Парламенту і Ради 2000/60/ЄС від 23 жовтня 2000 року про встановлення рамок заходів Співтовариства в галузі водної політики. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_962#Text (дата звернення: 16.08.2025)
9. Порядок розроблення нормативів гранично допустимого скидання забруднюючих речовин у водні об'єкти та переліку забруднюючих речовин, скидання яких нормується (затверджено постановою Кабінету Міністрів України від 11 вересня 1996 р. № 1100 URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1100-96-п (дата звернення: 16.08.2025)
10. Правила охорони поверхневих вод від забруднення зворотними водами. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/465-99-п (дата звернення: 16.08.2025)
11. Дозвіл на спеціальне водокористування ВП РАЕС № 53/RV/49d-20. (2020) URL: https://e-services.davr.gov.ua/ (дата звернення: 16.08.2025)
12. Malovanyy, M., Boiaryn, M., Biedunkova, O., Voloshyn, V., Netrobchuk, I. (2025). The impact of the ecological sustainability of landscapes on the formation of the hydro-ecological state in the upper part of the Prypiat River basin. Ecological Questions, 36(2), 1-21. DOI: https://doi.org/10.12775/EQ.2025.018
13. Boiaryn, M., Biedunkova, O., Netrobchuk, I., Radzii, V., Voloshyn, V. (2023). Assessment of ecological sustainability of the landscape of the Prypiat River basin within the Volyn region. Scientific Horizons, 26(12), 99-111. DOI: https://doi.org/10.48077/scihor12.2023.99
14. Інжинірингова та науково-технічна підтримка. Водно-хімічний режим системи технічного водопостачання відповідальних споживачів АЕС з ВВЕР. Загальні вимоги. СОУ НАЕК 067:2023. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=109230 (дата звернення: 16.08.2025)
15. Нормативи екологічної безпеки водних об'єктів, що використовуються для потреб рибного господарства, щодо гранично допустимих концентрацій органічних та мінеральних речовин у морських та прісних водах (біохімічного споживання кисню (БСК-5), хімічного споживання кисню (ХСК), завислих речовин та амонійного азоту). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1369-12#Text (дата звернення: 16.08.2025)
16. СОУ 05.01-37-385:2006 (2006). Вода рибогосподарських підприємств. Загальні вимоги та норми. Національний стандарт України. Київ, 15.
17. Про затвердження Гігієнічних нормативів якості води водних об'єктів для задоволення питних, господарсько-побутових та інших потреб населення (затверджено наказом Міністерства охорони здоров'я України 02 травня 2022 року № 721 URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0524-22#Text (дата звернення: 16.08.2025)
18. Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями (2012). А.В. Гриценко, О.Г. Васенко, Г.А. Верніченко та ін. Х.:УкрНДІЕП, 37.
19. Про затвердження Методики визначення масивів поверхневих та підземних вод. Наказ Міністерства екології та природних ресурсів України від 14.01.2019р. № 4. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0287-19#Text (дата звернення: 16.08.2025)
20. Isiuku, B. O., Enyoh, C. E. (2020). Pollution and health risks assessment of nitrate and phosphate concentrations in water bodies in South Eastern, Nigeria. Environmental Advances, 2, 100018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envadv.2020.100018
21. Chen, C. W., Ju, Y. R., Chen, C. F., Dong, C. D. (2016). Evaluation of organic pollution and eutrophication status of Kaohsiung Harbor, Taiwan. International Biodeterioration & Biodegradation, 113, 318–324. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.03.024
22. Biedunkova, O., Kuznietsov, P., Korbutiak, V. (2025). A study of surface water quality using organic pollution indices: Comparative characteristics and educational opportunities. Water Quality Research Journal, 60(2), 333-347. https://doi.org/10.2166/wqrj.2025.044
23. Kuznietsov, P., Biedunkova, O. (2025). Application of multivariate statistical techniques for assessing spatiotemporal variations of heavy metal pollution in freshwater ecosystems. Water Conservation Science and Engineering, 10(1), 13. DOI: https://doi.org/10.1007/s41101-025-00341-8
24. Biletska, Y., Djukareva, G., Nekos, A., Husliev, A., Krivtsova, A., Bakirov, M., Polupan, V., Onyshchenko V., Sokolova, E. (2020). Investigation of change of quality indicators of gluten-free bread during storage. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(11 (107), 54–61. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.215019
25. Nekos, A. N., & Boiaryn, M. V. (2022). Environmental Assessment of Water Quality of the Styr River (within the City of Lutsk). In 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, 1, pp. 1-5. European Association of Geoscientists & Engineers. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580157
26. Bezsonnyi, V., Nekos, A. (2022). Modeling of the oxygen regime of the Chervonooskilsky reservoir. In 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, 1, pp. 1-5. European Association of Geoscientists & Engineers. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580216

27. *Holoptsev, A. V., Dremuh, E., Abibulaeva, A. (2012). Impact Characteristics of Water Circulation Lead System for Pollution NPP Cooling Pond its Copper (On the Example of South-Ukrainian NPP). Visnyk of VN Karazin Kharkiv National University series «Ecology», (1004), 114-123. DOI: https://periodicals.karazin.ua/ecology/article/view/831*
28. *Rychak, T. L., Arkhypova, L. M. (2024). Environmental and toxicological assessment of the water quality of Burshtynska TPP cooling reservoir. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology, (30), 91-104. DOI: https://doi.org/10.26565/1992-4259-2024-30-07*
29. *Кишневский, В. А., & Чиченин, В. В. (2014). Дослідження показників хімконтролю водно-хімічного режиму оборотних систем охолодження електростанцій. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(8(70), 57–62. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.26312*
30. *Kuznietsov, P., & Biedunkova, O. (2023). Експериментальні випробування біоцидної обробки охолоджуючої води систем безпеки енергоблоків Рівненської атомної електростанції. Ядерна та радіаційна безпека, (1(97), 30-40. DOI: https://doi.org/10.32918/nrs.2023.1(97).04*
31. *Biedunkova, O., Kuznietsov, P. (2024). Dataset on heavy metal pollution assessment in freshwater ecosystems. Scientific Data, 11(1), 1241. DOI: https://doi.org/10.1038/s41597-024-04116-z*
32. *Xu, L., Xin, B., Liu, W., Liu, H., Yang, G., Hao, G. (2025). Biogeochemical Mechanisms of HCO_3–Ca Water and NO_3− Pollution in a Typical Piedmont Agricultural Area: Insights from Nitrification and Carbonate Weathering. Toxics, 13(5), 394. DOI: https://doi.org/10.3390/toxics13050394*
33. *Korbutiak, V. M., Stefanyshyn, D. V., Khodnevych, Y. V., Lahodniuk, O. A., Martyniuk, V. O. (2024). Analysis of current trends in water runoff of the Sluch River in terms of extraterritorial impacts of hydrotechnical construction. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1415, 1, 012102. DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/1415/1/012102*

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу
Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

An analysis of the formation of profiles of physical and chemical indicators discharge in the context of compliance with the environmental quality of the recipient river

Mykola Klymenko [1]
DSc (Agricultural), Professor, Head of the Department of Ecology, Environmental Protection Technologies and Forestry,
[1] National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine;
Liudmyla Romanchuk [2]
DSc (Agriculture), Professor, Department of Ecology and Environmental Protection Technologies,
[2] Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr, Ukraine;
Olha Biedunkova [1]
DSc (Biology), Professor, Department of Ecology, Environmental Protection Technologies and Forestry;
Nataliia Vozniuk [1]
PhD (Agricultural), Professor, Department of Ecology, Environmental Protection Technologies and Forestry;
Olena Likho [1]
PhD (Agricultural), Associate Professor, Professor of the Department of Ecology, Environmental Protection Technologies and Forestry

ABSTRACT

Introduction. Rivne Nuclear Power Plant, located on the Styr River, releases return water into the river without pre-treatment. While radiological impacts are well controlled, non-radiological effects remain poorly studied. **The purpose** of this work was to assess the non-radiological influence of Rivne NPP's ORCS discharges on the physicochemical quality of the river. The research object comprised additional return cooling waters from the Rivne NPP and water from the river in the discharge zone. The subject was the variation of physicochemical quality indicators and their compliance with operational, discharge, and environmental standards.

Methods. In 2023, weekly sampling was performed for additional cooling water, return water from the ORCS, and Styr River water downstream of the discharge. Measured parameters included pH, temperature, dry residue, alkalinity, hardness, Cl^-, SO_4^{2-}, PO_4^{3-}, Na^+, K^+, NO_3^-, NO_2^-, $N–NH_3$, SS, DO, COD, and BOD_5. Analyses were conducted according to standardized methods. The data were compared with operational standards, permissible concentrations in return water and maximum permissible concentrations (MPC) for the environment. The water quality of the river was assessed

using the following indices: salinity (SC), trophic-saprobiological state (TSS), organic pollution (OPI), nutrient pollution (NPI), and eutrophication (EI). Statistical analysis included descriptive statistics, Pearson correlation, cluster analysis and principal component analysis (PCA) using JASP version 0.14.3.

Results and Discussion. Return water parameters were stable and within discharge standards. Styr River water largely met ecological MACs, but sporadic exceedances occurred: pH up to 8.66 (above 8.5), COD up to 83.2 mgO_2/L (MAC = 50 mgO_2/L), ammonium nitrogen up to 2.13 mg/L (MAC = 0.5 mg/L), PO_4^{3-} up to 0.798 mg/L (MAC = 0.7 mg/L), and BOD_5 up to 3.87 mgO_2/L (MAC = 3 mgO_2/L). These deviations were observed both upstream and downstream of the discharge, suggesting non-local sources unrelated to NPP activity. PCA identified three principal components explaining 66.9% of variance: PC1 (39.2%) linked to temperature and mineralization (Cl^-, SO_4^{2-}, NO_3^-, Na^+, K^+), PC2 (18.6%) related to pH, alkalinity, hardness, and dissolved oxygen, and PC3 (9.1%) defined by SO_4^{2-} and BOD_5. Positive correlations were found between temperature and nitrates, pH and ammonium, and negative correlations between COD and BOD_5 or SO_4^{2-} and BOD_5. Cluster analysis showed that SO_4^{2-}, NO_3^- and $N–NH_3$ demonstrate the most consistent relationships between the return water and the Styr River. According to the integral indices (IC, ITS, OPI, NPI, EI), it was found that the river water is characterized by a high degree of purity in terms of salt composition (IC = 1.25), the absence of eutrophication (EI = 0.08) and a low level of organic pollution (OPI = 0.15), with a slight trophic-saprobic load (ITS = 3.25) and moderate nutrient pollution (NPI = 1.56).

Conclusions. Rivne NPPs ORCS return water met permissible concentrations, indicating effective cooling and water treatment. Styr River water generally complied with ecological MACs, and rare exceedances were not linked to Rivne NPP. PCA and correlation analyses identified temperature and mineralization as the main drivers of variability. Overall water quality is good but requires preventive, continuous monitoring and improved water management to ensure long-term ecological stability and environmental safety.

***Keywords**: environmental safety, water discharge, return water, regression dependencies, principal component analysis, cluster analysis, water quality indices, water quality indicators, environmental standards*.

References

1. *Biedunkova, O., Kuznietsov, P., Mandryk, O. (2025). Study of the dominant modes of formation and variability of potentially toxic element concentrations and their impact on environmental quality. Chemosphere, 388, 144688. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144688*
2. *Kuznietsov, P.; Biedunkova, O. (2025). The role of carbonate equilibrium in scale formation of calcium carbonate in a power plant open recirculating system. Data-Centric Engineering, 6, e13. https://doi.org/10.1017/dce.2025.9*
3. *Biedunkova, O.; Kuznietsov, P.; Pinchuk, O. (2025). Comprehensive assessment of scale formation, corrosion, and biological pollution in a cooling water supply system. MethodsX, 14, 103154. https://doi.org/10.1016/j.mex.2025.103154*
4. *Abbas, Q.; Yaqoob, H.; Sajjad, U.; Ali, H. M.; Jamil, M. M. (2025). Utilization of local coal in Pakistan's oil-fired power plants and future clean technologies for power generation. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 11, 101132. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2025.101132*
5. *Kurek, K.; Młyński, D.; Bugajski, P.; Nowobilska-Majewska, E. (2019). The impact of treated sewage on water quality in Mordarka Stream. Journal of Ecological Engineering, 20(1), 39–45. https://doi.org/10.12911/22998993/93874*
6. *Biedunkova, O.; Kuznietsov, P. (2025). Integration of water management in the assessment of the impact of heavy metals discharge from the power plant with mitigation strategies. Ecological Indicators, 175, 113618. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113618*
7. *Water Code of Ukraine. Available online: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Text (accessed on 16 August 2025). [in Ukrainian]*
8. *Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of water policy. Available online: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_962#Text (accessed on 16 August 2025).*
9. *Regulation on the development of standards for the maximum permissible discharge of pollutants into water bodies and the list of pollutants subject to regulation. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 1100 of 11 September 1996. Available online: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1100-96-n (accessed on 16 August 2025). [in Ukrainian]*
10. *Rules for the protection of surface waters from pollution by return waters. Available online: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/465-99-n (accessed on 16 August 2025). [in Ukrainian]*
11. *Permit for special water use of Rivne NPP No. 53/RV/49d-20. (2020). Available online: https://e-services.davr.gov.ua/ (accessed on 16 August 2025). [in Ukrainian]*
12. *Malovanyy, M.; Boiaryn, M.; Biedunkova, O.; Voloshyn, V.; Netrobchuk, I. (2025). The impact of the ecological sustainability of landscapes on the formation of the hydro-ecological state in the upper part of the Prypiat River basin. Ecological Questions, 36(2), 1–21. https://doi.org/10.12775/EQ.2025.018*
13. *Boiaryn, M.; Biedunkova, O.; Netrobchuk, I.; Radzii, V.; Voloshyn, V. (2023). Assessment of ecological sustainability of the landscape of the Prypiat River basin within the Volyn region. Scientific Horizons, 26(12), 99–111. https://doi.org/10.48077/scihor12.2023.99*
14. *Engineering and Scientific-Technical Support. Water-chemical regime of technical water supply systems of responsible consumers of NPPs with VVER. General requirements. SOU NNEGC 067:2023. Available online:*

https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=109230 (accessed on 16 August 2025). [in Ukrainian]
15. Environmental safety standards for water bodies used for fish farming regarding maximum allowable concentrations of organic and mineral substances. Available online: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1369-12#Text (accessed on 16 August 2025). [in Ukrainian]
16. SOU 05.01-37-385:2006 (2006). Water of fishery enterprises. General requirements and norms. National Standard of Ukraine. Kyiv, 15. [in Ukrainian]
17. On the approval of Hygienic Standards for Water Quality in Water Bodies for Drinking, Domestic and Other Needs of the Population (approved by Order of the Ministry of Health of Ukraine No. 721 of 2 May 2022. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0524-22#Text (accessed on 16 August 2025). [in Ukrainian]
18. Methodology for environmental assessment of surface water quality by relevant categories (2012). A.V. Gritsenko, O.G. Vasenko, G.A. Vernichenko et al. Kharkiv: UkrNDIEP, 37. [in Ukrainian]
19. On approval of the Methodology for determining surface and groundwater bodies. Order of the Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine dated 14 January 2019, 4. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0287-19#Text (accessed on 16 August 2025) [in Ukrainian]
20. Isiuku, B. O.; Enyoh, C. E. (2020). Pollution and health risks assessment of nitrate and phosphate concentrations in water bodies in South Eastern, Nigeria. Environmental Advances, 2, 100018. https://doi.org/10.1016/j.envadv.2020.100018
21. Chen, C. W.; Ju, Y. R.; Chen, C. F., Dong, C. D. (2016). Evaluation of organic pollution and eutrophication status of Kaohsiung Harbor, Taiwan. International Biodeterioration & Biodegradation, 113, 318–324. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.03.024
22. Biedunkova, O.; Kuznietsov, P.; Korbutiak, V. (2025). A study of surface water quality using organic pollution indices: Comparative characteristics and educational opportunities. Water Quality Research Journal, 60(2), 333–347. https://doi.org/10.2166/wqrj.2025.044
23. Kuznietsov, P.; Biedunkova, O. (2025). Application of multivariate statistical techniques for assessing spatiotemporal variations of heavy metal pollution in freshwater ecosystems. Water Conservation Science and Engineering, 10(1), 13. https://doi.org/10.1007/s41101-025-00341-8
24. Biletska, Y.; Djukareva, G.; Nekos, A.; Husliev, A.; Krivtsova, A.; Bakirov, M.; Polupan, V.; Onyshchenko, V.; Sokolova, E. (2020). Investigation of change of quality indicators of gluten-free bread during storage. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(11), 54–61. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.215019
25. Nekos, A. N.; Boiaryn, M. V. (2022). Environmental assessment of water quality of the Styr River (within the City of Lutsk). 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, 1, 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580157
26. Bezsonnyi, V.; Nekos, A. (2022). Modeling of the oxygen regime of the Chervonooskilsky reservoir. 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment 2022, 1, 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580216
27. Holoptsev, A. V.; Dremuh, E.; Abibulaeva, A. (2012). Impact characteristics of water circulation lead system for pollution NPP cooling pond its copper (on the example of South-Ukrainian NPP). Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, Series Ecology, (1004), 114–123. https://periodicals.karazin.ua/ecology/article/view/831
28. Rychak, T. L.; Arkhypova, L. M. (2024). Environmental and toxicological assessment of the water quality of Burshtynska TPP cooling reservoir. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology, (30), 91–104. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2024-30-07 [in Ukrainian]
29. Kishnevskyi, V. A.; Chichenin, V. V. (2014). Study of control indicators of the water-chemical regime of recirculating cooling systems of power plants. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(8(70)), 57–62. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.26312
30. Kuznietsov, P.; Biedunkova, O. (2023). Experimental tests of biocidal treatment for cooling water of safety systems at Rivne NPP Units. Nuclear and Radiation Safety, 1(97), 30–40. https://doi.org/10.32918/nrs.2023.1(97).04
31. Biedunkova, O.; Kuznietsov, P. (2024). Dataset on heavy metal pollution assessment in freshwater ecosystems. Scientific Data, 11(1), 1241. DOI: https://doi.org/10.1038/s41597-024-04116-z
32. Xu, L.; Xin, B.; Liu, W.; Liu, H.; Yang, G.; Hao, G. (2025). Biogeochemical mechanisms of HCO_3–Ca water and NO_3^- pollution in a typical piedmont agricultural area: Insights from nitrification and carbonate weathering. Toxics, 13(5), 394. https://doi.org/10.3390/toxics13050394
33. Korbutiak, V. M.; Stefanyshyn, D. V.; Khodnevych, Y. V.; Lahodniuk, O. A.; Martyniuk, V. O. (2024). Analysis of current trends in water runoff of the Sluch River in terms of extraterritorial impacts of hydrotechnical construction. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1415(1), 012102. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1415/1/012102

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 21 August 2025
Accepted 17 November 2025

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-43
UDC 574.6:628.16
Received 6 May 2025
Accepted 11 August 2025

Aquatic Ecosystem Degradation Due to Industrial Pollution: A Case Study of the Okchu River

Kamila Majidli [1]
Lecturer, Department of Ecology,
[1]Azerbaijan University of Architecture and Construction, Baku, Azerbaijan,
e-mail: kamila.jafarli@azmiu.edu.az, https://orcid.org/0000-0002-5535-1321;
Ahmad Mammadov [2]
HYDROLOG LLC, Baku, Azerbaijan
e-mail: ahmad.m@hidrolog.az, https://orcid.org/0009-0008-5601-2242;
Fagan Aliyev [1]
Head of Department of Ecology,
e-mail: ie_academy@yahoo.com, https://orcid.org/0000-0002-2026-9862

ABSTRACT

State of the problem. Once recognized for its substantial hydropower potential of about 130 million kWh annually, the Okchu River is now classified among the most polluted rivers globally due to severe heavy metal contamination, making it unsuitable for human use without extensive treatment. The ecological degradation, mainly caused by copper-molybdenum mining in Armenia's Gafan and Gajaran regions, has led to declining biodiversity, unsafe water quality, and health risks for communities dependent on the river.

Object learning. The article proposes a comprehensive strategy for developing hydropower resources along the Okchu River in Azerbaijan while simultaneously addressing ecological challenges. It aims to restore the river's health by combining hydropower development with corrective ecological measures, ensuring a balance between energy production and environmental sustainability.

Methodology. The research employs historical and contemporary datasets, including water and sediment quality assessments, supported by environmental monitoring conducted by Azerbaijani and international bodies. Analytical approaches are used to measure concentrations of heavy metals – specifically copper, iron, and nickel – and to assess their ecological consequences on the river's ecosystem and groundwater resources. In 2023, 108 water samples and 39 bottom sediment samples from the Oxchuchay River underwent 1,728 physico-chemical, 398 physico-chemical, and 3 ecotoxicological analyses. Findings revealed that iron, zinc, copper, and manganese concentrations were considerably higher than those of other metals.

Research results. Findings reveal that copper-molybdenum concentrations far exceed permissible limits, endangering drinking water safety, agricultural irrigation, and aquatic life. Monitoring at the Shayıflı station in 2023 revealed frequent exceedances of ammonium (up to 2.4 mg/L, 4.8× MPC) and manganese (up to 674 µg/L, 6.74× MPC), indicating episodic contamination. Iron levels fluctuated widely, peaking at 946 µg/L (3× MPC) in May and dropping to 37.7 µg/L in October. Hardness and sulfate remained mostly within limits but showed clear seasonal trends, linked to climatic and hydrological factors. The study highlights the declining ecological condition of the Okchu River while presenting a hydropower development plan expected to generate 120–140 million kWh annually, supplemented by an additional 70 million kWh from a new Hydropower Plant. To safeguard ecological flow, a 5.3 km purified-water pipeline to the Shayifli reservoir is proposed, along with innovative water management techniques and advanced monitoring systems.

The scientific novelty of the research. This study introduces an integrated framework that prioritizes sustainable hydropower generation alongside ecological restoration. By combining cross-border collaboration, advanced monitoring technologies, and ecological flow management, it outlines a model for balancing industrial development with the urgent need for environmental protection in transboundary river systems.

Keywords*: chemical parameters of water, ecosystem, hydropower, water resources, heavy metal pollution, monitoring of rivers, treatment methods, ecological assessment, water quality monitoring.*

In cites: Majidli Kamila, Mammadov Ahmad, Aliyev Fagan (2025). Aquatic Ecosystem Degradation Due to Industrial Pollution: A Case Study of the Okchu River. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 580-588. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-43

Introduction

The Okchu River, which originates from Kapicik Mountain (3,285 meters) in the Zangezur range, enters Azerbaijan at an elevation of 630 meters. After flowing approximately 30 kilometers, it reaches the Araz River at an elevation of 300 meters. Nearby urban centers, such as Gafan and Gajaran in Armenia, as well as Zangilan and Minjivan in Azerbaijan, are situated along its banks. While the river holds an annual hydropower potential of 130 million kWh, it has been subjected to extensive pollution for years due to industrial discharge from the copper-molybdenum mines adjacent to Gafan and Gajaran. The pollution levels have surpassed all environmental standards, leading to the devastation of the river's ecosystem. The Okchu River is now categorized as one of the most polluted waterways globally, resulting in significant health hazards for those utilizing its water for various purposes.

Recent reports from both Azerbaijani and Armenian media indicate that Armenia continues to release industrial wastewater into the Okchu River

© *Majidli Kamila, Mammadov Ahmad, Aliyev Fagan, 2025*

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

without adequate treatment. A report by the Ministry of Ecology and Natural Resources of Azerbaijan noted that the levels of copper-molybdenum compounds in the river water were twice the acceptable limit, with iron levels four times higher and nickel levels seven times higher. Water samples from the Okchu River revealed alarming environmental risks, with water often displaying a white or yellowish hue. Studies conducted by experts from the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences in 2017 indicated that the water quality of the Okchu River corresponded to the IV degree of ecological condition typical of mining-impacted water basins [3]. The influx of river water contaminated with heavy metals represents a significant ecological catastrophe. Moreover, the Okchu River serves as a primary source for groundwater recharge in the Zangilan region, which is increasingly threatened by the accumulation of heavy metals along the river channel and their eventual mixing with groundwater. Immediate action is necessary to safeguard the river's ecosystem and the precious groundwater resources it supports [2].

Materials and Methods

The Okchu River's hydrological dynamics were analyzed by collecting water samples from various locations along its course, particularly in areas impacted by industrial activities and cross-border pollution from Armenia. Monthly sampling was conducted from January 2021 (still continued) to assess seasonal variations and contamination levels.

Samples were analyzed for heavy metals (copper, molybdenum, manganese, iron, nickel, cadmium) using standard analytical techniques. Measurements of dissolved oxygen, biochemical oxygen demand (BOD_5), and nutrient levels (ammonium, nitrite) were also performed. In addition, sediment samples were collected to evaluate the accumulation of heavy metals and their persistence. Long-term hydrological data from the Okchu River were statistically analyzed to identify flow rates and seasonal trends.

Comparative analyses with historical data from previous monitoring periods (1980-1989) were conducted to ascertain trends in water quality degradation and changes in pollutant concentrations over time. Risk assessments based on observed pollutant levels were performed to quantify environmental risks related to water and sediment contamination in the Okchu River. Strategies for ecological flow management were proposed to mitigate the impact of reduced water quality, including the establishment of reservoirs to store cleaner water and controlled releases to maintain necessary ecological flow rates.

Results and Discussion

The Okchu River is 83 km long with a catchment area of 1,175 km². It flows through a region with significant industrial activity, primarily mining. Historical hydrological observations conducted from 1946 to 1988 indicated that the river is unsuitable for water supply. The river's average annual discharge is estimated at 11.2 cubic meters per second, with an annual volume of approximately 353.7 million cubic meters, largely influenced by snow (46%), rain (10%), and groundwater (44%).

Monitoring data revealed alarming concentrations of heavy metals in the river water, including copper-molybdenum compounds that are significantly above acceptable limits. The river's fauna has been decimated, with severe health risks for communities relying on it for water supply and irrigation. The Ministry of Ecology and Natural Resources reported that the levels of heavy metals and biogenic substances in the Okchu River have consistently exceeded normative values [20].

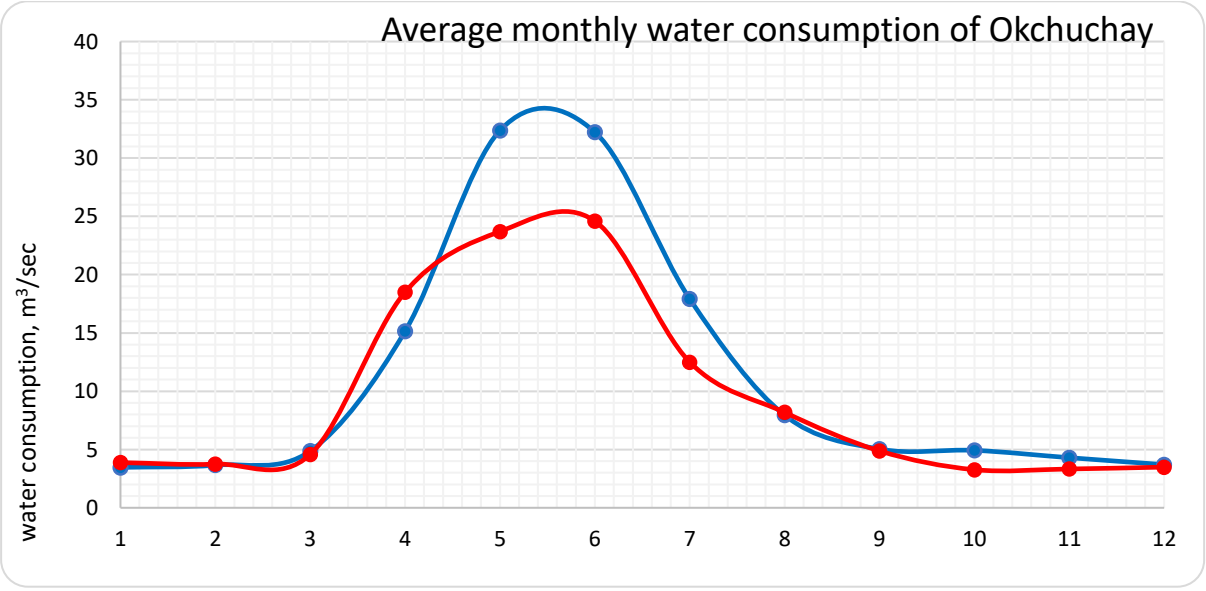


Fig. 1. Average monthly water consumption of Okchuchay

Nestled within the basin of the Okchu River, a vital tributary of the Araz River, the industrial hubs of Gafan and Gajaran play a pivotal role in Armenia's mining landscape. However, this significant waterway has faced substantial environmental challenges over the years, primarily due to the effluents released by the Gajaran copper-molybdenum and Gafan ore processing facilities. The pollution stemming from these industrial activities has resulted in alarming concentrations of heavy metals – such as copper, molybdenum, manganese, iron, zinc, and chromium – endangering both aquatic life and human health.

Recent assessments conducted by the Ministry of Ecology and Natural Resources of Azerbaijan have underscored the gravity of the situation. Findings indicate that copper-molybdenum levels in the river exceed acceptable limits by double, while iron and nickel concentrations soar to four and seven times the permissible thresholds, respectively. Such figures illustrate the urgent need for intervention to mitigate the adverse effects on the river's ecosystem and surrounding communities [24].

Analysis of Pollutant Variation Dynamics in the Aquatic Environment Based on Water Samples Collected from the Oxchuchay River in 2023 (Shayıflı Station)

According to the results of water sample analyses conducted in 2023 from the Oxchuchay River, the variation dynamics of pollutants in the aquatic environment were monitored at ten-day intervals. At the Shayıflı station, samples were collected three times per month – during each ten-day period – and analyzed to assess changes in pollutant concentrations throughout the year [17].

Based on the analysis of monthly changes in pollutant concentrations at the Shayıflı monitoring station in 2023, the following key results were observed:

- **Ammonium (NH_4) and Manganese (Mn) consistently exceeded acceptable limits** during multiple 10-day periods, with ammonium peaking at 2.4 mg/L in February (4.8 times the MPC) and manganese reaching up to 674 µg/L in the same month (6.74 times the MPC), indicating significant episodic contamination.
- **Iron (Fe) concentrations showed the highest fluctuation**, with levels peaking at 946 µg/L in May (over 3 times the MPC) and dropping as low as 37.7 µg/L in October, reflecting irregular but intense pollution events.
- **Hardness and sulfate levels, while mostly within regulatory limits, displayed notable seasonal trends**, with higher hardness observed in the winter months and sulfate peaking in spring and late autumn, suggesting variability influenced by climatic and hydrological factors

Table 1

Monthly Dynamics of Water Pollutants in Shayıflı Station (2023)

Month	Hardness			Ammonium (NH_4)			Manganese (Mn)			Molybdenum (Mo)			Iron (Fe)			Sulfate (SO_4)		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
January	–	16.4	16.5	–	0.0	1.3	–	144	574	–	164	308	–	392	908	–	372	586
February	17.1	14.0	10.0	1.3	1.2	2.4	438	642	674	233	247	674	638	808	811	498	476	277
March	10.6	10.8	9.9	1.5	1.6	1.6	427	386	625	234	170	233	875	104	183	372	381	247
April	11.8	8.4	7.6	0.0	0.0	0.0	163	175	153	95.4	202	219	223	886	664	205	104	200
May	8.8	8.4	6.0	0.0	0.0	0.0	414	319	158	234	204	122	203	111	946	212	294	171
June	3.1	3.89	4.2	0.0	0.0	0.0	212	170	143	38.5	44.4	65	154	705	444	93	133	141
July	4.86	6.0	6.9	0.0	0.0	0.0	325	102	238	135	143	245	181	511	101	129	205	217
August	7.3	7.76	8.3	0.0	0.2	0.0	125	19.8	34.8	221	248	237	564	34.1	58.9	213	225	253
September	8.2	8.1	8.0	0.1	0.0	0.0	11.2	10.8	7.5	263	141	94.9	40.5	77.1	44.5	251	257	372
October	9.69	8.33	10.1	0.0	0.0	0.0	35.8	142.7	20.5	153	126	170	53.1	51	37.7	359	390	403
November	10.45	12.5	12.4	0.0	0.0	1.1	8.1	276	140	73.5	273	114	8.1	162	76.6	348	476	498
December	11.4	9.23	11.0	0.0	0.4	0.0	200	35	45.8	295	237	277	161	87.7	751	400	272	365

Note: The Maximum Allowable Concentration (MPC) levels used for reference: Hardness = 7, NH_4 = 0.5, Mn = 0.1, Mo = 250, Fe = 300, SO_4 = 500 (units depending on substance, typically mg/L).

Throughout 2023, a total of 108 water samples were collected from the Oxchuchay River, and 1,728 physico-chemical analyses were conducted. Additionally, to assess pollution levels, 39 bottom sediment samples were collected, which underwent 398 physico-chemical and 3 ecotoxicological analyses for the determination of heavy metals. The results indicate that the concentrations of iron, zinc, copper, and manganese were notably higher compared to other metals [21].

Results of Hydrobiological Monitoring Conducted in the Oxchuchay River

In 2023, hydrobiological monitoring was conducted in the Oxchuchay River during the spring, summer, and autumn seasons – specifically in April, June, and October – with the aim of studying the river's hydrofauna. As part of the monitoring pro-

cess, a total of four macroinvertebrate samples were collected from the upper, middle, and lower reaches of the river. Species identification and subsequent analyses were carried out by "Azelab" LLC [18].

According to the analysis results:

- In samples collected in April, 13 macroinvertebrate species belonging to the classes *Insecta* and *Annelida* were identified. Among these species:
  - 4 were classified as meso-saprobic, indicating suitability for moderately polluted waters.
  - 9 were identified as polysaprobic species, which are typically found in heavily polluted waters.
- In the samples collected in June, a total of 243 macroinvertebrate individuals belonging to *Insecta* and *Annelida* were recorded. Analysis of these samples revealed:
  - 3 species of oligosaprobic macroinvertebrates (total count: 45), typically inhabiting slightly polluted waters.
  - 4 species of meso-saprobic macroinvertebrates (count: 195), found in moderately polluted waters.
  - 1 polysaprobic macroinvertebrate species from the class *Annelida* (count: 3), indicating high pollution.
- In October, 57 macroinvertebrate individuals belonging to the class *Insecta* were identified. Among them:
  - 5 species were classified as oligo- and oligo-meso-saprobic, typically found in clean to slightly polluted waters, totaling 23 individuals.
  - 2 meso-saprobic species were identified, inhabiting moderately polluted waters, totaling 26 individuals.
  - 1 polysaprobic species, characteristic of highly polluted waters, was recorded with a total count of 8 individuals [13].

These findings illustrate the diversity of macroinvertebrate species corresponding to various pollution levels in the river ecosystem. Each species identified is considered an indicator organism adapted to specific pollution conditions. Research also shows that certain organisms, such as members of the family *Hydropsychidae* from the order *Trichoptera*, typically found in clean waters, may adapt to moderately or heavily polluted environments in the absence of suitable habitats. This adaptive capacity is indicative of broader biological resilience in response to fluctuating environmental conditions [26].

In order to ensure continuous monitoring of the river's ecological stability, daily monitoring activities were conducted from February 2 to February 10, 2024. During this period, water samples were collected at various times throughout the day and subjected to appropriate laboratory analyses to determine the level of pollution (Table 2).

Based on the analysis of the results:

- At the Jahangirbeyli station (lower reaches), hardness exceeded the permissible concentration by a factor of 1.9, ammonium ion by 3.2 times, and manganese – a heavy metal – by 2.2 times.
- At the Shayifli station (middle reaches), hardness exceeded the limit by a factor of 2.0, ammonium ion by 4.4 times, and manganese by 3.2 times.
- At the Burunlu station (upper reaches), hardness was found to be 2.0–2.4 times, ammonium ion 3.0–4.4 times, and manganese 1.2–3.3 times higher than the permissible concentration limits.

The graphs below illustrate the indicators that exceeded the permissible concentration limits in the water samples collected throughout 2024 from the Burunlu station (located in the upper reaches of the Oxchuchay River, near the border) [13].

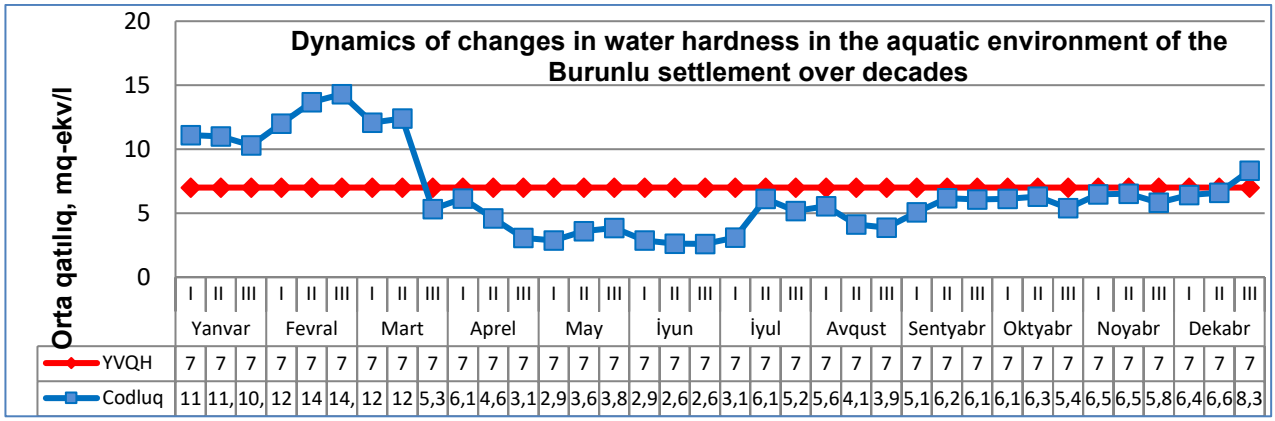
As illustrated in the graphs, a decrease in the concentration of pollutant components was observed in the samples collected from various stations along the Oxchuchay River during the April–September period of the current year. However, beginning in the second ten-day period of September, increases in the concentrations of certain pollutants were recorded.

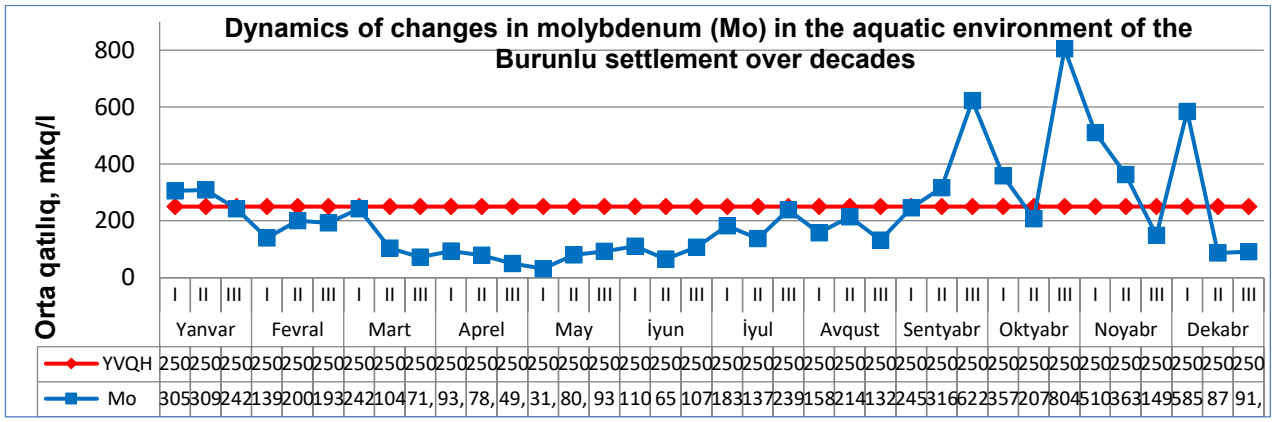
Based on the analysis results of bottom sediment samples collected in 2024 from the Burunlu station (located in the upper reaches of the Okchu-

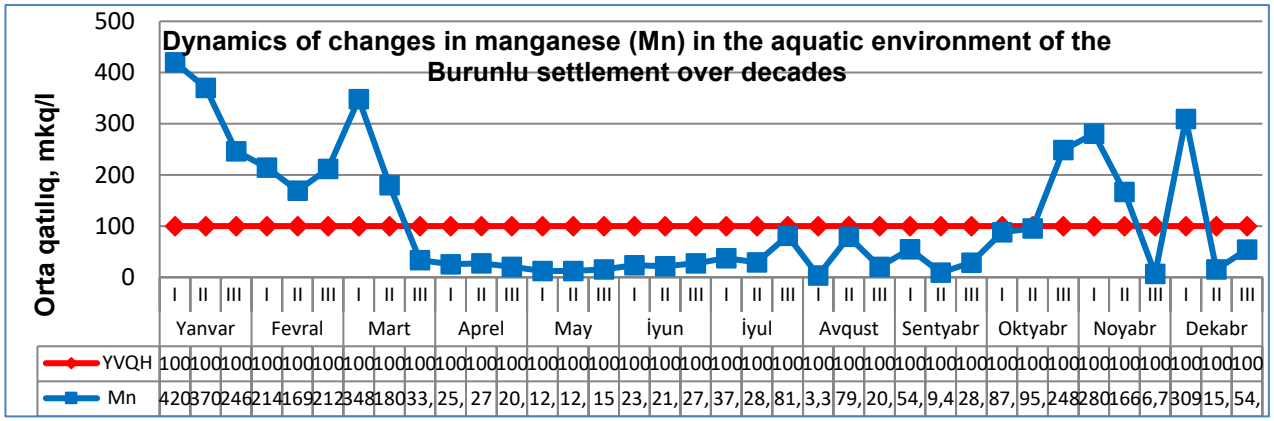
Table 2

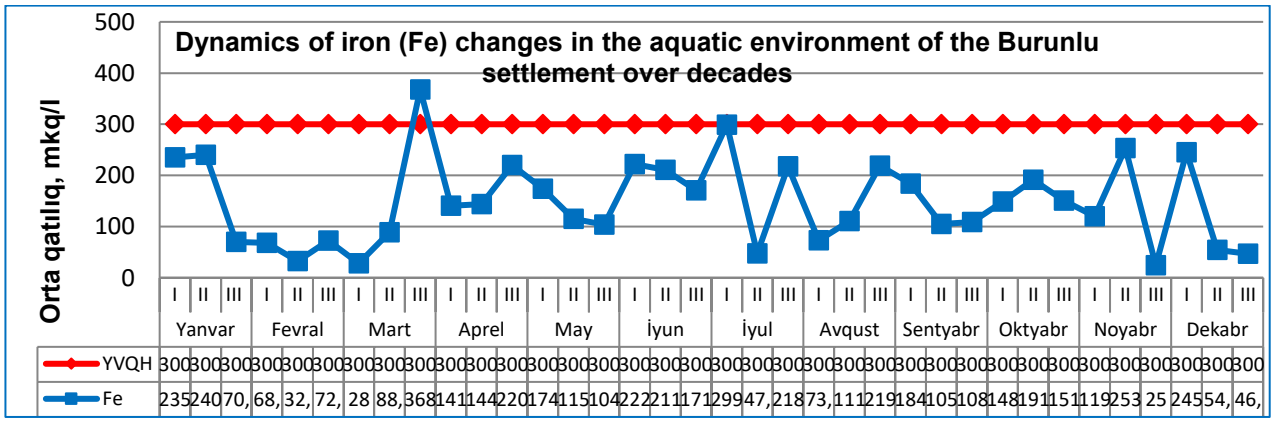
Daily monitoring activities results from February 2 to 10,2024 in the Burunlu station (located in the upper reaches of the Oxchuchay River)

Components	02,02,24	05.02.24			06.02.24				09.02.24				10.02.24		
		14:20	18:00	19:30	10:30	13:30	15:30	16:15	13:50	16:00	17:00	01:30	07:45	16:00	18:00
pH	7,2	6,9	6,91	6,9	7	6,9	6,9	6,88	7,53	7,39	7,35	7,33	7,32	7,44	7,47
Zn	63,7	25,4	1,1	0,4	58,8	72,8	67,8	50	32	28,9	29,2	41,6	45	26	29,3
Fe	68,3	36,3	2,6	LOD	67,7	92,9	90,3	79,3	56,1	66,3	82,1	232	272	165,0	169,0
Pb	0,443	0,173	0,145	0,207	0,125	0,135	0,143	0,157	0,667	0,13	0,183	0,128	0,836	0,162	0,429
Ni	0,4	7,0	4,4	6,9	0,962	3,23	0,393	1,89	0,978	LOD	3,07	2,3	5,24	2,72	2,64
Mo	222,0	159,0	61,7	13,6	235	257	256	217	167	142	149	47,8	39,1	59,3	76,3
Mn	328,0	118,0	16,6	8,2	295	284	271	251	219	187	254	208	218	218	235
Cu	12,5	44,8	4,3	0,1	10,6	16,8	13	16,8	6,52	10,9	11,5	32,8	11,9	27,8	19,4



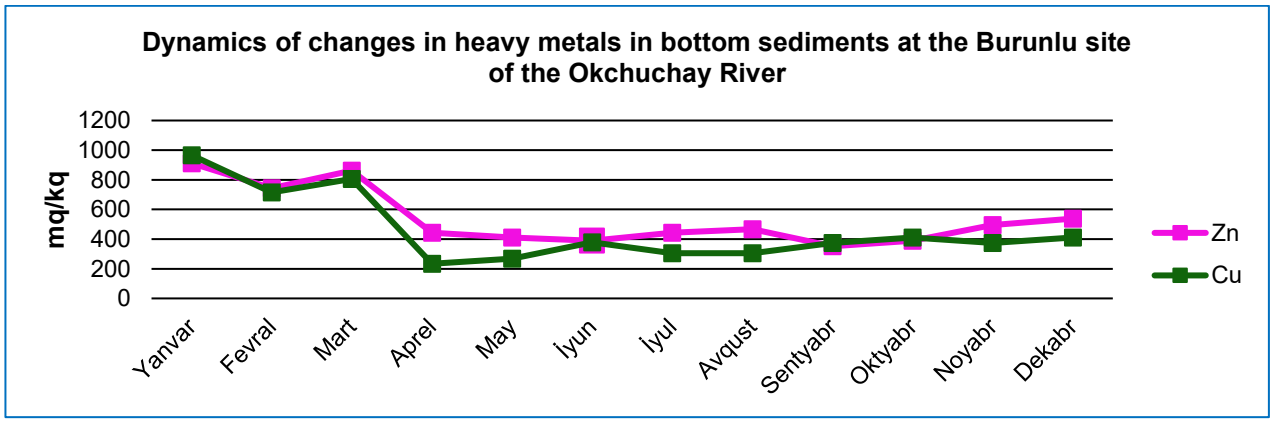


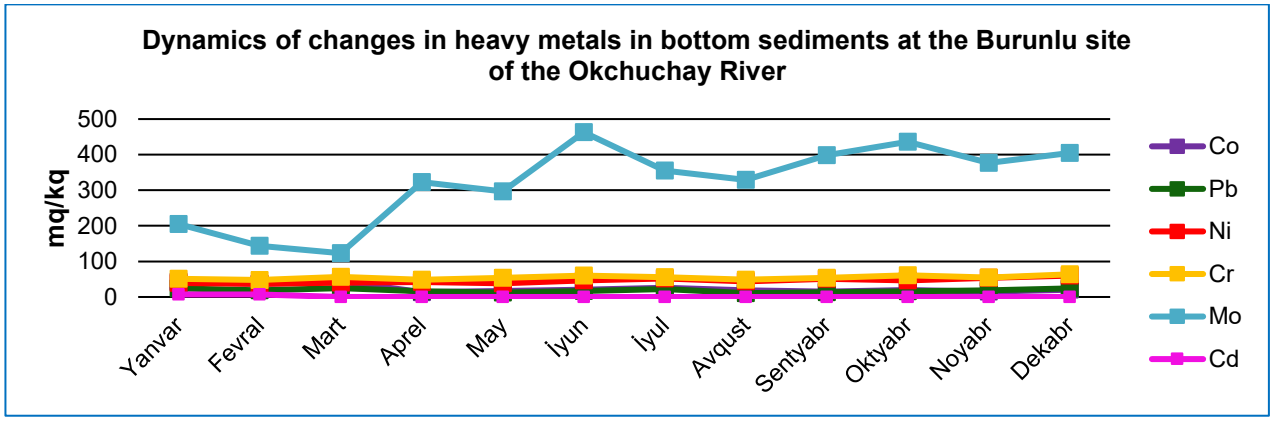




chay River, near the border), the annual variation trends of heavy metals are presented in the graphs below.

Based on calculations and research, the Oxchuchay River ranks among the highest in the region in terms of long-term average ion discharge. Estimates indicate that the river's multi-year average water flow is 9.76 m³/s, with a total discharge volume of 308 million m³, and a multi-year average ion discharge of 226,000 tons. The river's annual hydroelectric potential is estimated at 110 million kilowatt-hours.





A promising avenue for addressing these issues lies in the effective utilization of the Okchuchay River's hydropower potential. This dual-purpose initiative aims not only to safeguard the river's ecosystem but also to harness its energy capabilities. To facilitate ongoing water quality monitoring, it is essential to deploy specialized automated systems at the river's entry into our republic. Complementing this technological upgrade, the construction of a regulating reservoir with a capacity of 3-4 million cubic meters at an elevation of 630 meters will allow for enhanced flow management. Water diverted from the main channel through a DN2200 mm pipe will be directed to the "Zangilan-1" Hydropower Plant, strategically located near Zangilan city at 465 meters elevation, boasting a total installed capacity of 9.5 MW.

Projected Energy Generation

The implementation of this hydropower project is expected to yield approximately 120-140 million kWh of electricity annually. Water from this facility will initially flow to the forthcoming "Zangilan-2" Hydropower Plant, set to be constructed at an elevation of 300 meters along the Araz River, utilizing a DN2200 mm diameter pipeline over a distance of 17.0 km. It is projected that this Small Hydropower Plant will generate an additional 70 million kWh of energy annually, thus providing reliable 'Green Energy' to over 90,000 residents [9, 10, 11].

The operational framework of these plants will capitalize on river overflow conditions from April to July, with expected water discharges ranging from 18-20 m³/sec. However, limitations during May and June will restrict the diversion to 10 m³/sec. The remaining river flow will be redirected into the Araz River via the hydropower stations, thereby improving the overall water quality and benefiting the river's ecosystem.

To further enhance the ecological integrity of the Okchu River, a portion of the water collected in the intake reservoir will be channeled via a 5.3 km DN1600 mm pipeline to the 'Shayifli' reservoir, positioned outside the river channel. This reservoir will serve as a means to reintroduce purified water back into the river system, ensuring a sustainable ecological flow that protects both surface and underground water resources.

The successful execution of this project holds the potential to significantly mitigate the ecological crisis currently afflicting the river while simultaneously generating substantial electrical output. Currently, four small hydropower stations are under construction to capitalize on the hydropower potential of the Okchuchay River, marking a pivotal step toward sustainable resource management.

Comprehensive Hydropower and Ecosystem Conservation Strategy for the Okchu River:

- The Okchu River, a vital waterway in the Republic of Armenia, is currently facing significant ecological challenges due to heavy metal contamination along its 30 km stretch. Immediate and effective action is imperative to safe-

guard the river's ecosystem and restore its health.

- Proposed Hydropower Developments: To enhance the protection of the river's environment, a strategic plan involving the establishment of hydropower plants (HPPs) with a total capacity of 40 MW is under consideration. This initiative involves diverting the primary flow of the river through a specially constructed derivation pipe that runs parallel to the river's channel.
- Optimizing Hydropower Potential: This innovative approach to hydropower development not only aims to harness the river's energy potential but also ensures that 80-90% of its flow is redirected and subsequently released into the Araz River. Such an arrangement promises to maximize energy generation while prioritizing ecological stability.
- Innovative Water Management Solutions: To further enhance ecosystem protection, the installation of advanced river monitoring sensors is recommended. These sensors will enable the identification of periods when the river exhibits relatively cleaner water flow. During these optimal times, water can be collected in an auxiliary reservoir, which will later be utilized to maintain ecological flow within the river channel.
- Construction of the Shayifli Reservoir: A proposed reservoir with a capacity of 35 million cubic meters will be situated on the right bank of the Shayifli tributary, strategically located outside the main flow of the river. By utilizing the cleaner water from the Okchu River to fill this reservoir, we can ensure a consistent and regulated ecological flow (Qeko ≈ 1.5-2.0 m³/sec) is maintained in the river's natural course



Fig. 2. Plan of facilities to be created for ecosystem protection in Okchu River

Conclusion

The Okchu River stands as a crucial water resource within the region, yet its severe industrial pollution has rendered it one of the most contaminated rivers globally. The ongoing pollution of the Okchu River has resulted in a significant decline in biodiversity, particularly in fish populations, due to toxic water inflow. The relentless discharge of untreated industrial effluents from copper-molybdenum mining operations has severely degraded water quality, jeopardizing aquatic life and posing substantial health risks to human populations. Effective management strategies are imperative to combat further pollution and restore the river's water quality. Prioritizing the river's hydropower potential over its compromised water supply function offers a viable pathway for sustainable resource management. Continued cooperation between Armenia and Azerbaijan is essential to address transboundary pollution challenges and ensure the long-term sustainability of this vital natural resource for future generations.

In conclusion, the strategic integration of hydropower development with ecological preservation measures will not only address the immediate environmental concerns but also promote a sustainable future for the Okchu River and its surrounding communities.

References

1. *Özbek, M., Aygen, C., Taşdemir, A., et al. (2023). Determination of the ecological status of an Aegean river (Türkiye) using benthic macroinvertebrates as an indicator of water quality. Environmental Monitoring and Assessment, 195(9), 1231. DOI: https://doi.org/10.1007/s10661-023-11834-1*
2. *Yanygina, L.V., Schletterer, M. (2023). Macroinvertebrates reveal environmental gradients: methods and method development in the Ob River basin. Hydrobiologia, 850(9), 2045–2059. DOI: https://doi.org/10.1007/s10750-023-05335-y*
3. *Fornasaro, S., Ghezzi, L., Shukurov, N., et al. (2024). Water quality and dissolved load in the Chirchik and Akhangaran river basins (Uzbekistan, Central Asia). Environmental Monitoring and Assessment, 196(9), 854. DOI: https://doi.org/10.1007/s10661-024-13014-1*
4. *Muhamedieva, D.T., Niyozmatova, N.A. (2023). Assessment of the ecological state of a water body for biodiversity monitoring according to biological and hydrochemical indicators. E3S Web of Conferences, 411, 02043. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341102043*
5. *Liu, L., Xu, Z., Yin, X., et al. (2023). Development of an index based on fish, macroinvertebrates, phytoplankton, and physicochemical properties to assess urban aquatic ecosystems in Jinan, China. River Research and Applications, 39(1), 73–83. DOI: https://doi.org/10.1002/rra.4062*
6. *Turkic Academy. (2024, November). Regional review report: Water future vision and cooperation for sustainability in Turkic States. Turkic Academy. https://turkicstates.org/u/d/publications/water-raport-2024-15012025-1.pdf*
7. *Khalilov, I., & Eminov, F. (2024). Against the background of global climate changes, the current ecological situation of Azerbaijan's water resources and the directions of efficient use. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series «Geology. Geography. Ecology» (61), 392. DOI: https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-31*
8. *European Union Water Initiative Plus (EUWI+). (n.d.). Kura River Basin. https://www.euwipluseast.eu/en/about/pilot-river-bassin/kura*
9. *Milenić, D., Vasiljević, P., & Vranješ, A. (2010). Criteria for use of groundwater as renewable energy source in geothermal heat pump systems for building heating/cooling purposes. Energy and Buildings, 42(7), 1047–1053. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.11.002*
10. *Power-Calculation.com. (n.d.). Hydroelectricity power calculator May 3, 2025– Calculation of hydroelectric power and energy. https://power-calculation.com/hydroelectricity-energy-calculator.php*
11. *El-Monem A. El-Aziz Nawar, M. A. (2016). Hydro power plant technology. Helwan University, Faculty of Engineering, Mechanical Power Department. https://www.academia.edu/25161084/HYDRO_POWER_PLANT_TECHNOLOGY?email_work_card=view-paper*
12. *Sakal, H. B. (2022). The Risks of Hydro-Hegemony: Turkey's Environmental Policies and Shared Water Resources in the South Caucasus. Caucasus Survey, 10(3), 294–323. DOI: https://doi.org/10.30965/23761202-20220016*
13. *Salmanov, M. A., Ansarova, A. H., and Huseynov, A. T. (2020). Microbiological Specification of The Araz River. J. Complement. Med. Res., 11(5), 146–149.*
14. *Al-Mur, B. A. (2021). Assessment of heavy metal contamination in water, sediments, and Mangrove plant of Al-Budhai region, Red Sea Coast, Kingdom of Saudi Arabia. J. Taibah Univ. Sci. 15, 423–441. DOI: https://doi.org/10.1080/16583655.2021.1985871*
15. *Manafova, Y. K. (2019). Some Diagnostic Parameters of Typical Soils on North-Eastern Slope of the Great Caucasus in Azerbaijan. Bull. Nizhnevartovsk State Univ., 2, 126–136.*
16. *Mehdiyeva, V., Khalilov, I., and Eminov, F. (2023). Greening and Agroecological Assessment of the Agricultural Sector of the Karabakh Region. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series «Geology. Geography. Ecology» (59), 298-306. DOI: https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-22*
17. *Majidli Kamila (2018). Natural resources of small rivers in the Republic of Azerbaijan and energy sources. Ecoenergy Scientific Journal, 4, 11-18. https://ieeacademy.org/wp-content/uploads/2019/01/eko-4.2018-tam.pdf*
18. *Majidli K. Aliyev, F. G. (2024). Protection of biodiversity in Bergushad and Hakary rivers. Research in Agricultural & Veterinary Sciences, 8(1), 13-20. http://jomardpublishing.com/uploadfiles/files/journals/rv/v8n1/majidli_aliyev.pdf*
19. *Majidli Kamila (2023). Tubular treatment of Okchuchay water. Ecoenergy Scientific Journal, 4, 10-13. https://ieeacademy.org/wp-content/uploads/2024/01/ecoenergetics-N4-2023-1.pdf*
20. *Tao, Y., Yuan, Z., Xiaona, H., and Wei, M. (2012). Distribution and bioaccumulation of heavy metals in aquatic organisms of different trophic levels and potential health risk assessment from Taihu lake, China. Ecotoxicology Environ. Saf. 81, 55–64. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.04.014*
21. *Majidli, K., (2025) Environmental impact of the use of hydropower potential and its role for sustainable development in Azerbaijan., Universidad y Sociedad, 17, 6, e5627, La Habana, Cuba https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/issue/view/111*
22. *Majidli, K., F.G.Aliyev, M.I.Maharramov, (2025) Integrated evaluation of river water quality, aquatic ecosystem health, and renewable energy potential, International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE), 17(4): 472-481. https://www.iotpe.com/IJTPE/IJTPE-2025/IJTPE-2025.html*
23. *Zheng, H., Cao, S., Jiang, Q. et al. Evaluation of initial geostress field of underground powerhouse in the complex alteration area of western Sichuan based on back-propagation neural network method. Geomech. Geophys. Geo-energ. Geo-resour. 11, 24 (2025). DOI: https://doi.org/10.1007/s40948-025-00949-z*
24. *Jia, F., Wang, W., Han, Y. et al. Predictive framework of vegetation resistance in channel flow. Sci Rep 15, 7593 (2025). DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-025-91668-8*

25. *Wang, S., Dou, Z., Liu, D. et al. Research on power plant security issues monitoring and fault detection using attention based LSTM model. Energy Inform 8, 11 (2025). DOI: https://doi.org/10.1186/s42162-025-00473-0*
26. *The Ministry of Ecology and Natural Resources https://eco.gov.az/*

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Деградація водної екосистеми внаслідок промислового забруднення: дослідження річки Окчу

Каміла Мажидлі [1]
викладач, кафедра екології,
[1] Азербайджанський університет архітектури та будівництва,
Баку, Азербайджан;
Ахмад Мамедов [2]
ТОВ «ГІДРОЛОГ», Баку, Азербайджан;
Фаган Алієв [1]
завідувач кафедри екології

У статті пропонується комплексна стратегія розвитку гідроенергетичних ресурсів вздовж річки Окчу в Азербайджані з одночасним вирішенням екологічних проблем. Вона спрямована на відновлення здоров'я річки шляхом поєднання розвитку гідроенергетики з коригувальними екологічними заходами, забезпечуючи баланс між виробництвом енергії та екологічною стійкістю. У дослідженні використовуються історичні та сучасні набори даних, включаючи оцінки якості води та осаду, що підтверджуються екологічним моніторингом, що проводиться азербайджанськими та міжнародними організаціями. Аналітичні підходи використовуються для вимірювання концентрацій важких металів, зокрема міді, заліза та нікелю, та для оцінки їх екологічних наслідків для екосистеми річки та підземних водних ресурсів. Результати дослідження показали, що концентрації заліза, цинку, міді та марганцю були значно вищими, ніж у інших металів. Результати дослідження показують, що концентрації міді та молібдену значно перевищують допустимі межі, що загрожує безпеці питної води, сільськогосподарському зрошенню та водним організмам. Моніторинг на станції Шайіфлі у 2023 році виявив часті перевищення амонію (до 2,4 мг/л, 4,8× ГДК) та марганцю (до 674 мкг/л, 6,74× ГДК), що свідчить про епізодичне забруднення. Рівень заліза коливався в широких межах, досягнувши піку в 946 мкг/л (3× ГДК) у травні та знизившись до 37,7 мкг/л у жовтні. Жорсткість та сульфати залишалися переважно в межах норми, але демонстрували чіткі сезонні тенденції, пов'язані з кліматичними та гідрологічними факторами. Дослідження підкреслює погіршення екологічного стану річки Окчу, а також представляє план розвитку гідроенергетики, який, як очікується, вироблятиме 120–140 мільйонів кВт·год щорічно, доповнений додатковими 70 мільйонами кВт·год від нової гідроелектростанції. Для захисту екологічного стоку пропонується 5,3-кілометровий трубопровід очищеної води до водосховища Шайіфлі, а також інноваційні методи управління водними ресурсами та передові системи моніторингу. Це дослідження представляє інтегровану структуру, яка надає пріоритет сталому виробництву гідроенергетики разом з екологічним відновленням. Поєднуючи транскордонну співпрацю, передові технології моніторингу та управління екологічним стоком, воно окреслює модель балансування промислового розвитку з нагальною потребою в захисті навколишнього середовища в транскордонних річкових системах.

Ключові слова*: хімічні параметри води, екосистема, гідроенергетика, водні ресурси, забруднення важкими металами, моніторинг річок, методи очищення, екологічна оцінка; моніторинг якості води.*

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу
Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 6 травня 2025 р.
Прийнята 11 серпня 2025 р.

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-44
UDC 911.3:504.5(479.24)(479.25)
Received 19 May 2025
Accepted 18 November 2025

Assessment of the hazard risk of the Metsamor Nuclear Power Plant (NPP) in Nakhchivan autonomous republic

Elnara Seyidova [1]
Phd (Pedagogy), Head of the Department of Geography,
[1] Nakhchivan State University, Nakhchivan, Azerbaijan,
e-mail: eliseyid23@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-0486-2324;
Narmin Salmanli [1]
Phd student (Geography), Lecturer, Department of Geography,
e-mail: narminsalmanli@ndu.edu.az, https://orcid.org/0000-0003-0490-2565;
Gülten Kara [2]
PhD (Cartography), Lecturer, Department of Geomatics Engineering,
[2] Karadeniz Technical University, Trabzon, Türkiye
e-mail: gispir@ktu.edu.tr, https://orcid.org/0000-0002-8340-6019;
Nurlana Ganbarova [1]
Lecturer, Department of Geography,
e-mail: qenberlinurlana@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-1839-754X

ABSTRACT

Problem Statement. Although nuclear power plants are considered to be a more economically efficient type of energy, they are considered a source of environmental danger in many respects. The Metsamor Nuclear Power Plant (Armenia) is one of the main sources of environmental risk, contributing not only to ecological problems in the area of its location within Armenia but also to transboundary impacts on neighboring countries, particularly affecting the Nakhchivan Autonomous Republic (Azerbaijan), as well as Eastern Anatolia (Türkiye), western Iran and parts of the South Caucasus (Georgia, Armenia, and Azerbaijan).

The aim of this study. The aim of the study is to study atmospheric dispersion processes, The aim of the study is to assess the environmental impact of radioactive discharges, in relation to the location of MNPP reactors in a high seismic-risk border region, and to investigate the possible transport of pollutants to the Nakhchivan Autonomous Republic via air currents and the Aras River.

Research Methodology. The study covers a spatial analysis of transboundary radioecological hazards in the Aras River basin, based on the collection of hydroecological samples in the field, laboratory analysis of water and ichthyofauna, geoinformation mapping, and a comprehensive assessment of seismotectonic risks. Physico-chemical, microbiological and biological parameters (pH, heavy metals, nitrates, phosphates, oxygen content, etc.) were investigated in water samples, and fish were used as bioindicators to assess the long-term accumulation of radionuclides. Furthermore, using ArcGIS (ArcMap) software, the risk factors of tectonic processes that have occurred and could occur in the area were studied, and an ecological zoning map of the Nakhchivan Autonomous Republic portion of the Aras River basin was prepared.

Scientific novelty of the research. For the first time, the radiological risk associated with the Metsamor NPP has been assessed in the Nakhchivan Autonomous Republic based on an integrated regional analysis of atmospheric transport, riverine dispersion, and the biological migration of radioisotopes. In recent years, ecological zoning has been carried out and a map has been prepared, illustrating the impact of the Metsamor NPP on the Aras River basin and the Aras reservoir.The novelty of the study is characterised by the development of a spatial model of transboundary ecological risk in the Aras River basin, based on the integration of hydrochemical indicators, biotic accumulation data, and seismic hazard analysis.

Results. The study determined that the main pathways of radionuclide dispersal are the Aras River, atmospheric circulation, and fish migration. Taking into account the potential dispersion of radioactive waste in the basin, the area's rivers were divided into three categories based on their ecological condition: clean, relatively clean, and highly polluted. A map compiled using ArcMap confirms the area's seismic risk, showing that hundreds of earthquakes with a maximum magnitude of 7 have been recorded in the last 45 years since the AES began operating. The environmental risk posed by the Metsamor Nuclear Power Plant to the region was determined on the basis of a comprehensive analysis of the migration pathways of radionuclides in the atmospheric, hydrographic, and biological environments, as well as an integrated assessment of hydrochemical, biotic, and seismic indicators in the Aras River basin.

Keywords: *Metsamor Nuclear Power Plant (NPP), Nakhchivan Autonomous Republic, seismotectonic hazard, radioactive risk assessment, pollution, radionuclide contamination, environmental safety, river basin, energy.*

In cites: Seyidova Elnara, Salmanli Narmin, Kara Gülten, Ganbarova Nurlana (2025). Assessment of the hazard risk of the Metsamor Nuclear Power Plant (NPP) in Nakhchivan autonomous republic. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 589-603. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-44

Introduction. Energy production is one of the main factors in environmental pollution. However, the threat factor is not energy, but its form of production. Energy security protects the country, its citizens, society, state and economy. It is a state of protection from threats to reliable fuel and energy supply. These threats are determined by external (geopolitical, macroeconomic, cyclical) factors, as well as the management and activities of the country's energy sector [12]. There are several sources of radioactive pollution in the Aras River Basin. Among these, the Armenian Metsamor Nuclear Power Plant (MNPP), which

© Seyidova Elnara, Salmanli Narmin, Kara Gülten, Ganbarova Nurlana, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

has always been considered a source of danger for the region, should be noted (Figure 1). Although harmful effects such as alkaline environmental pollutants, greenhouse gases that affect global warming, heavy metals, waste, radiation and others arise during energy production, it is possible to benefit from all technologies provided that safety measures and clean production are ensured.

Energy safety must be taken into account in the MNPP inherited from the Soviet Union and having completed its operational life. Today, the Metsamor Nuclear Power Plant is one of the rare examples of nuclear reactors built without primary containment structures.

The main indicators of the MNPP are given in the table below, citing the World Nuclear Association [41].

As can be seen from the table, the two main reactors at Metsamor are of the VVER-440 type. VVER is a series of water-cooled, high-pressure water reactors designed in the late 1960s (Table 1). The two active reactors of this type (Kola-1 and Kola-2) are in Russia and have the same reactor type as Metsamor. As with Metsamor, these reactors have been refurbished to extend their life and increase energy production [39].

During the design of the NPP, it was decided to install a VVER-400 reactor instead of the RBMK reactor. This decision reflected the technological and engineering priorities of that period, however, subsequent assessments have raised concerns that safety considerations associated with the plant's design characteristics may be associated with elevated safety vulnerabilities under severe accident conditions. [39].



Fig. 1. Metsamor NPP (*Source:* Environmental Justice Atlas, based on OpenStreetMap data)

Table 1

Main indicators of Metsamor NPP

Reactor	Reactor type	Current situation	Amount of energy it provides, MW	Energy capacity, MW	Launch date	Term of service	Cleaning device
Metsamor 1	VVER 440/230	Not working	376	407.5	28.12.1976	25.02.1989	SBO-1
Metsamor 2	VVER 440/230	working	376	407.5	05.01.1980	(2016)	SBO-4

On October 15, 1982, at 09:58, a fire broke out in shaft 16 of the NPP. And at 12:45, control of the reactor was completely lost. Due to damage to the protection system, the cooling system failed, a dangerous accumulation of hydrogen was recorded, and the fire lasted for 7 hours. The fire was extinguished, but as a result, many people died, both workers and firefighters, and the survivors lost their lives within several months [15].

Although Russian state authorities and state-affiliated nuclear agencies later insisted on closing the plant, Armenia insisted on additional modifications to the plant's safety, such as improved fire doors. A UNDP energy expert noted that the Metsamor NPP's WVER reactor is old and lacks concrete containment domes to contain potential explosion debris [42].

The addition of a third and new reactor to the plant is a frequent topic on Armenia's agenda. One of the characteristics of the VVER-40 reactors is the lack of a protection system against the release of harmful waste into the atmosphere, and another is the weak fire protection system (IAEA-2022, Nuclear Technology Review. Report by the Director General [30].

The geographical location of the MNPP is shown in the table below (Table 2). As can be seen from the table, the South Caucasus and Eastern Anatolia is under greater danger, considering the possible accidents and the impact of atmospheric circulation in the region, even though the plant is located 74 km away from the Nakhchivan Autonomous Republic.

Station RDL (Releaseable Dose Limit) categories:

1) Category A – Metsamor;

2) Category B – Armavir, Margara, Ejmadzin, Igdir;

3) Category C – Yerevan, Tuzluca, Nakhchivan.

Regarding the distribution paths of radionuclides, they occur mainly from 3 sources - the Aras River, atmospheric circulation, and fish migration.

Table 2

Geographical location of Metsamor NPP

from Yerevan	40 km	In the West
From Igdir	16 km	In the North
From Gars	100 km	In the East
From Nakhchivan	160 km	In the northwest
It is located on the 8-point Alagöz-Aghri fault line in the Aras structural region		

106 medium and low-level accidents have occurred at Metsamor NPP, 78 of which were recorded through monitoring, 14 in the Türkiye and the Armenian Republic [25].

If we take into account that 38 years ago - in April 1986, a terrible accident occurred at the Chernobyl NPP in Ukraine, which was in a better technical condition than MNPP, the potential scale of nuclear risk becomes evident. The fire triggered by the accident was extinguished within nine days, during which large amounts of radioactive decay products were released into the atmosphere and subsequently deposited over vast areas of the former USSR and Western Europe. As a result of the radiation hazard, more than 300,000 residents were evacuated. Estimates of radiation-related fatalities range from approximately 4,000 according to United Nations assessments to up to 200,000 according to Greenpeace. Although Azerbaijan is geographically more distant from NPP, the country may face comparatively higher vulnerability in the case of an accident at Metsamor due to specific regional geographical, climatic, and atmospheric circulation features that could facilitate the transboundary transport of radionuclides.

The Chernobyl disaster in 1986, which falls into the same category, was the result of a flawed design of the Soviet reactor and serious errors by the plant operators. This was a direct result of the Cold War isolation and the resulting lack of any safety culture [40]. Moreover, the problem is not only the inadequacy of technology. Even with the use of the latest generation of technology, the city of Metsamor, Armavir Province, is constantly exposed to the risk of a sudden accident, being located on the fault zone of the Agri fault line [7]. This distinguishes it from other nuclear power plants in the world. The risks associated with the MNPP have received renewed international attention following the Fukushima Daiichi nuclear accident, which is widely regarded as one of the most significant nuclear disasters of the 21st century due to its long-term environmental and radiological consequences. Therefore, one of the primary concerns addressed in this study is the potential risk posed by the MNPP to neighbouring territories, particularly given that it is located approximately 120 km from the state border of Azerbaijan and 74 km from the border of the Nakhchivan Autonomous Republic. This risk is associated with the plant’s ageing design, its seismic vulnerability, and the possibility of significant environmental impact in the event of a severe accident.

The aim of this study. The main goals are to investigate the impact of the potential hazard of the

MNPP on the surrounding areas, taking into account physical and geographical parameters to determine the direction of movement and scope of radionuclides with particular attention to the potential transport of contaminants to the territory of the Nakhchivan Autonomous Republic through air circulation and the Aras River, to conduct appropriate zoning, and prepare a map and scheme.

Literature Review

The assessment of radiological and environmental risks associated with NPPs, particularly those with aging infrastructure in seismically active regions, constitutes a critical and evolving field of research. This review synthesizes global perspectives on transboundary nuclear risk and situates the specific case of the MNPP within the broader context of environmental security in the South Caucasus.

In addition to this framing, practical case studies on VVER-440 units show that comprehensive seismic requalification coupled with targeted structural retrofits (e.g., bracing, roof stabilization, soil–structure interaction modeling) can materially increase safety margins under site-specific design spectra offering a relevant benchmark for Soviet-era designs like MNPP [10].

Global Context of Nuclear Risk and Transboundary Contamination

Major nuclear accidents have defined our understanding of transboundary radiological threats. The 1986 Chernobyl disaster demonstrated that radiological consequences do not respect political borders, with atmospheric dispersion depositing radionuclides across Europe [28]. Post-Chernobyl research established long-term contamination paradigms, showing how isotopes like Caesium-137 and Strontium-90 persist in ecosystems and bioaccumulate in food chains, necessitating decades-long environmental monitoring [33]. The 2011 Fukushima Daiichi accident reinforced the risk of natural hazards triggering technological disasters, highlighting vulnerabilities in plant design and emergency response [16]. These events underscore that risk assessment must integrate technological safety with geophysical and meteorological factors.

A key mechanistic insight from post-Fukushima research is the role of local atmospheric processes in contaminant transport. [35] demonstrated that radioactive plumes from Fukushima were frequently transported over 200 km to Tokyo via nocturnal local wind systems, including mesoscale low-pressure systems and sea breezes. This finding challenges the assumption that plume dispersion is governed solely by large-scale weather patterns. It highlights the critical importance of diurnal atmospheric cycles and local topography in determining contamination pathways for populated areas downwind of an NPP. Following this, [36] further showed that dispersion directions can be accurately predicted using near-surface wind patterns, providing a robust framework for modeling atmospheric pathways.

Parallel modeling for Türkiye and the South Caucasus using the FLEXPART Lagrangian particle model demonstrates that plume pathways and depositions vary sharply by season and synoptic regime; comparative scenarios for Akkuyu, Sinop and MNPP show south-dominant transport in summer months and north/east shifts in winter, with Chernobyl-like source terms producing an order-of-magnitude higher depositional load than routine scenarios [8].

A key contemporary focus is the specific vulnerability of aging Soviet-era reactor designs, such as the VVER-440/V-230 model operational at Metsamor. Technical assessments note that these Generation II reactors often lack modern containment structures and safety features, potentially elevating the consequences of a severe accident [34;16]. The International Atomic Energy Agency (IAEA) emphasizes that prolonged operation of such plants requires rigorous, ongoing safety upgrades and stress tests, a concern magnified for plants in high-risk zones [16].

Corroborating this, a detailed seismic requalification of VVER-440/213 units at Paks used 3-D finite-element models, soil–structure interaction (SASSI/STRUDYN), and staged retrofits executed during operation (e.g., new vertical bracing, roof diaphragms, frame-to-tower link bridges), and verified capacity to 0.25 g (H) / 0.23 g (V) site spectra–illustrating the feasibility and limits of retrofit-based risk reduction for legacy VVERs [10].

Seismic Risk as a Critical Multiplier for Metsamor NPP

The intersection of nuclear infrastructure and seismicity is a well-researched risk multiplier. Research shows that locating NPPs in active tectonic regions introduces a catastrophic risk dimension. This is acutely relevant for the MNPP, situated near the Anatolian fault system. [27] explicitly label Metsamor a "potential Caucasian Fukushima" due to its position in a high-magnitude seismic zone. Their analysis concludes that despite being designed for intensity 8 earthquakes, the plant is in a region with a potential for intensity 11 events.

The regional seismic hazard is exceptionally well-documented. [20] provide a comprehensive tectonophysical analysis of active faulting and associated natural hazards in Armenia, eastern Türkiye, and northwestern Iran. They identify the region encompassing the MNPP as a zone of concentrated, interrelated hazards where earthquakes interact with landslides and volcanic activity. The Ararat depression–a large pull-apart basin–is described as a high-

risk area where major fault systems converge. The 1840 M7.4 Ararat earthquake, which triggered a volcanic eruption, massive landslides, and river course changes, serves as a historic analogue for the compound disaster potential in this transboundary region. [32] adds that while the plant is reportedly resistant to magnitude 7 seismic activity, international assessments reference a potential for magnitude 8 events. He also notes the plant lacks a primary containment structure standard in later VVER models, and international stress tests identified vulnerabilities in secondary safety features like fire suppression systems.

From a mitigation standpoint, evidence from VVER-440 retrofit programs indicates that segment-specific seismic demand (including soil nonlinearity and building rotation) can be addressed through targeted stiffness and load-path enhancements; however, such measures do not substitute for the absence of full-pressure containment, leaving residual consequence risk if severe core damage occurs [10].

Atmospheric and Hydrological Pathways of Radioactive Contamination

Transboundary pollution pathways are central to modeling regional risk from MNPP. Atmospheric circulation is a primary vector. Studies specific to the South Caucasus, such as those by [5;6], detail how prevailing wind patterns could transport radioactive plumes from Armenia into neighboring territories, including Azerbaijan's Nakhchivan Autonomous Republic, Türkiye, and Iran, within hours. The insights of [35] on nocturnal transport are directly relevant, suggesting that local wind systems (e.g., mountain-valley breezes in the Ararat basin) could dominate contaminant transport under calm conditions.

Applied dispersion experiments using FLEXPART for Akkuyu, Sinop and MNPP further show that identical source terms produce contrasting hot-spot geographies across months: August simulations favor southward export and North Africa/Eastern Mediterranean deposition, whereas December simulations shift maxima toward the Black Sea–Eastern Europe corridor–underscoring the need to parameterize diurnal cycles and seasonal synoptics in MNPP emergency planning [8].

Hydrological pathways, particularly river systems, facilitate another critical route for long-term contamination. Research on riverine transport shows that radionuclides can travel vast distances, affecting water quality, sediment, and biota far downstream [33]. [6] identify the Aras River as a key potential conduit for pollutants from the MNPP, impacting Nakhchivan and ultimately the Caspian Basin. [18] provide empirical baseline data from a transboundary perspective, conducting an environmental health risk assessment in Türkiye's Iğdır province, located ~20 km from the MNPP. Their study found that measured levels of background radioactivity and concentrations of selected pollutants in soil and drinking water were below permissible limits at the time, suggesting no imminent health risk. This study serves as a crucial baseline but also underscores the need for vigilance, highlighting the plant's risky condition.

Integrating these atmospheric and hydrological pathways with operational source-term brackets from scenario libraries (e.g., Chernobyl-analog vs. moderate releases) meaningfully alters predicted deposition fields by an order of magnitude, as shown in regional FLEXPART case work; therefore, monitoring thresholds and protective-action distances should be scenario-conditioned rather than static [10].

Bioaccumulation and Ecological Monitoring

The use of biotic indicators, especially fish, to monitor radionuclides and heavy metal pollution is a well-established methodological approach. Fish integrate exposure over time and space, making them effective bioindicators for chronic contamination. Studies demonstrate the significant accumulation of isotopes like Cs-137 and Cobalt-60 in various fish species. Recent research refines our understanding of factors influencing uptake. For instance, [36] provide specific data on short-lived radionuclides (^{54}Mn, ^{60}Co, ^{65}Zn) in fish. This biomonitoring is crucial for assessing human health risks from fisheries consumption, a major concern noted in global studies on contaminants in fish tissues.

Regional dispersion studies recommend aligning bioindicator sampling transects with season-dependent plume corridors (summer southward vs. winter northward pathways) to maximize detection probability and improve source attribution in the Aras–Kura basin [8].

The Regional Research Gap and This Study's Contribution

While the global literature provides a robust framework, a discernible gap exists in integrated, spatially explicit risk assessments for the MNPP that focus concretely on downstream and downwind regions like Nakhchivan. Much existing work addresses specific vulnerabilities–such as atmospheric pathways, general threat levels, or seismic geology–in isolation. For example, while [27] provides a strong geological risk argument, they do not model detailed contamination pathways. [33] offers a comprehensive overview of operational challenges but does not provide a spatially explicit risk model. Studies like [18] offers valuable baseline data for one neighboring region but do not model the integrated, multi-vector risk across the entire Aras Basin. Furthermore, the critical insights on local-scale plume transport mechanisms from [35] have not been systematically applied to model potential at-

mospheric exposure pathways for Nakhchivan from the MNPP.

Few studies combine empirical hydrochemical analysis, biological monitoring, detailed seismic zonation, and high-resolution atmospheric modeling that accounts for diurnal cycles into a holistic, spatially differentiated ecological risk zoning map for the entire Aras River basin. This study aims to address this gap. It develops a composite spatial model of transboundary risk by integrating these multi-hazard perspectives. It thereby contributes a needed regional case study to the broader discourse on the environmental safety of aging nuclear infrastructure in conflict-prone, seismically active zones characterized by compound natural hazards.

Accordingly, the present work couples (i) segment-aware seismic forcing and retrofit limits for legacy VVERs, drawing on demonstrated requalification practices, with (ii) FLEXPART-based seasonal dispersion ensembles for MNPP and comparators (Akkuyu, Sinop), to produce scenario-conditioned exposure maps and monitoring priorities for the Aras basin.

Materials and research methods. ***The role of seismic and tectonic factors in shaping the environmental risk of the study area*****.** The MNPP is located in an 8-point earthquake zone and on the East Anatolian fault line. After the Spitak earthquake in 1989, the MNPP, which provided 30-35% of Armenia's electricity, was shut down, and in 1993 it resumed operations with 2 units [44]. Taking into account all these dangers, we have prepared a map of the seismological zones of the Republic of Armenia based on the analysis of tectonic movements that have occurred in the areas near the station since 1980 and the results of these movements. Within the scope of the study, earthquake data covering the period 1980–2025 were obtained from the United States Geological Survey (USGS) Earthquake Catalog. The dataset was subsequently processed using appropriate geoprocessing tools in ArcMap software, resulting in the preparation of a tectonic activity–based zonation map of the study area. (Figure 2).

As can be clearly seen from the map, earthquakes with a magnitude of 4.5 and above have occurred almost every year. Considering that the NPP

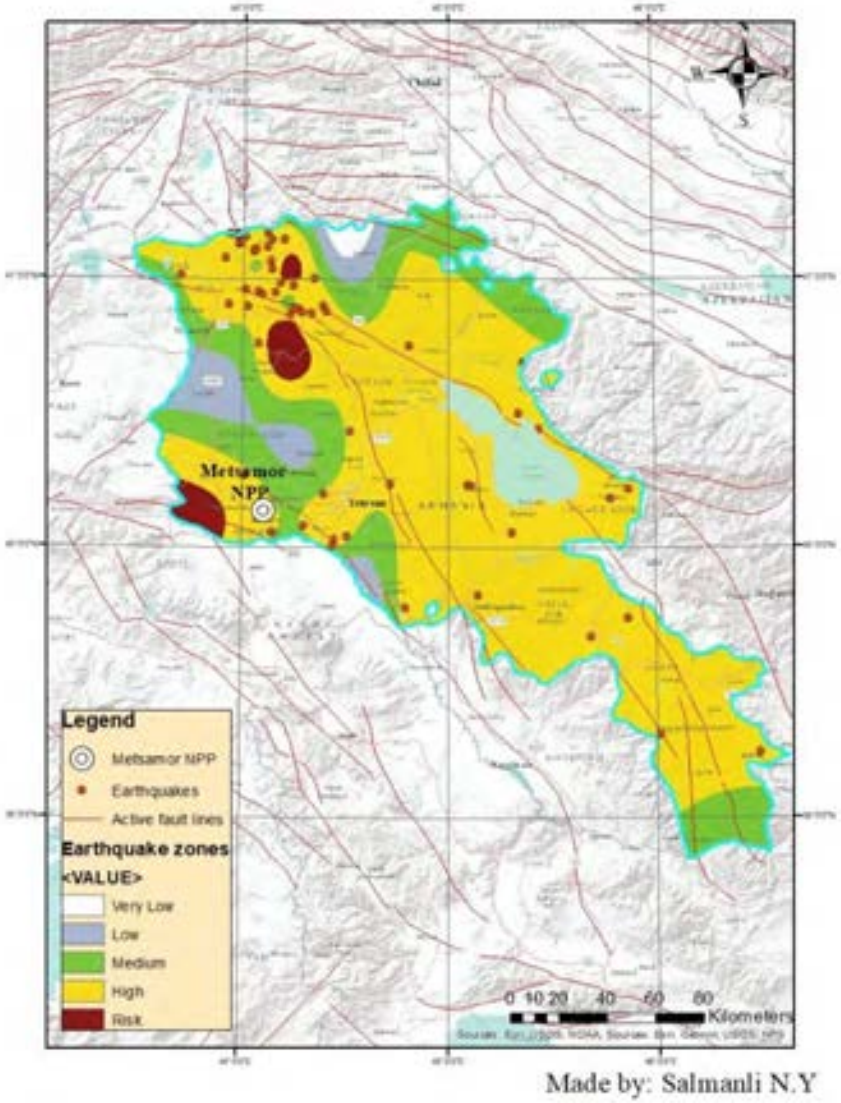


Fig. 2. Seismological zones of the Republic of Armenia

is in an emergency state and has reached the end of its operational life, we can see how dangerous this is for the region. Moreover, the problem is not only related to the inadequacy of technology. Even if the latest generation technologies are used, the location of the city of Oktyabryan on the Aghri fault line poses the risk of a sudden accident at any time. Under normal conditions, according to international standards (ISO 4917-1:2024 – Design of nuclear power plants against seismic events; IAEA Safety Standards Series No. SSG-67 – Seismic Design for Nuclear Installations (2021)) nuclear facilities should not be operated in conditions where there is an unaccounted for or unacceptable level of seismic risk without appropriate design measures. In 2006, the closure of that station was deemed necessary by the decision of the European Union, but despite this, it is still in operation.

The role of atmospheric circulation in the spread of radioactive waste in the Middle Aras natural region. The transboundary impact of the MNPP to the region, as well as to the Republic of Azerbaijan, is mainly atmospheric circulation [26] and, to some extent, pollution through the Aras River. In this regard, when studying the environmental impact of the MNPP, it is important to characterize the natural climatic conditions of the area where the plant is located.

Climate plays an exceptional role in the spread of radioactive substances. Many factors that shape climatic conditions - altitudinal zonation, geographical location, orographic features and the complexity of the relief - also determine the ecogeographical characteristics of the territory [2]. A number of synoptic-scale air masses influencing the territory of Azerbaijan, primarily mid-latitude westerly and south-westerly continental air flows, traverse the area of the MNPP and subsequently enter the Nakhchivan Autonomous Republic. [5].

Therefore, in the event of an accident at the station, the part of the Azerbaijan territory is under more serious danger than the Republic of Armenia. The interaction between climatic processes and environmental hazards has been widely discussed, particularlyregarding pollutant dispersion mechanisms and their potential impact on regional development [29]. Thus, during the accident at the Chernobyl NPP in 1986, thousands of people were evacuated from nearby settlements or continue to live in the affected areas of Belarus, Russia and Ukraine.

Although some studies have been ongoing for many years to provide a better understanding of the situation regarding the MNPP, they are not enough to determine the risk [22]. Taking all this into account, the atmospheric circulation of the region was studied through the Earth Nullschool website.

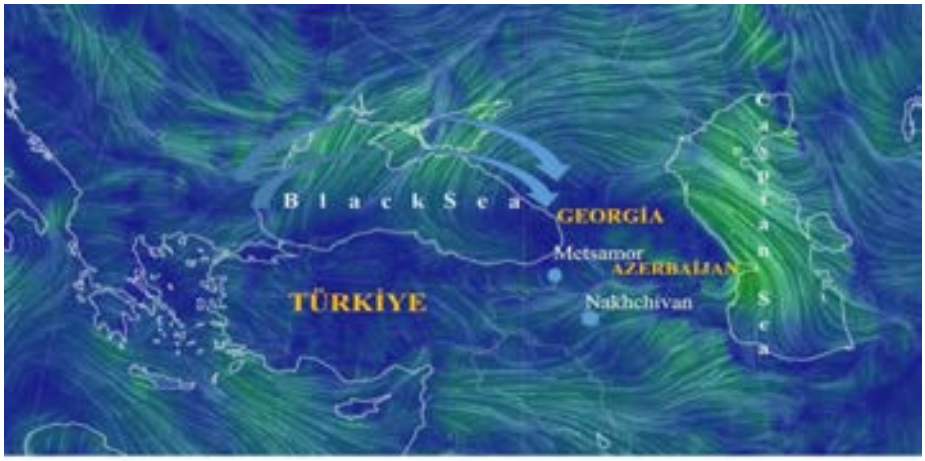


Fig. 3 A. Continental maritime air masses

The entry of radionuclides released from the NPP into the area through air currents as a result of any accident that may occur has been analyzed using data obtained from Earth NULL School. As shown (Figure 3 A), continental marine air masses enter the area over the MNPP, and the southern cyclones that dominate throughout the year (Figure 3 B) also enter the area over the NPP after which they continue to move in the direction of Azerbaijan, which once again proves how great a threat the Nakhchivan Autonomous Republic faces.

Under neutral (isothermal) atmospheric stratification and wind speeds of 5–10 m/s, the time it takes for the radioactive cloud to reach the territory of the autonomous republic may be 2 hours. At this time, the number of people who may be exposed to ionizing radiation in the contamination zone, which is 270 km long, 13 km wide, and has an area of 2980 km^2, is predicted to be 440 thousand people [3].

In order to timely warn the population in case of accidents and other radiation hazards that may pose a potential risk, as well as to eliminate the consequences, modern radiation search and measurement devices made in the USA and Germany, new personal protective equipment protecting the respiratory organs and body surface, as well as degassing equipment

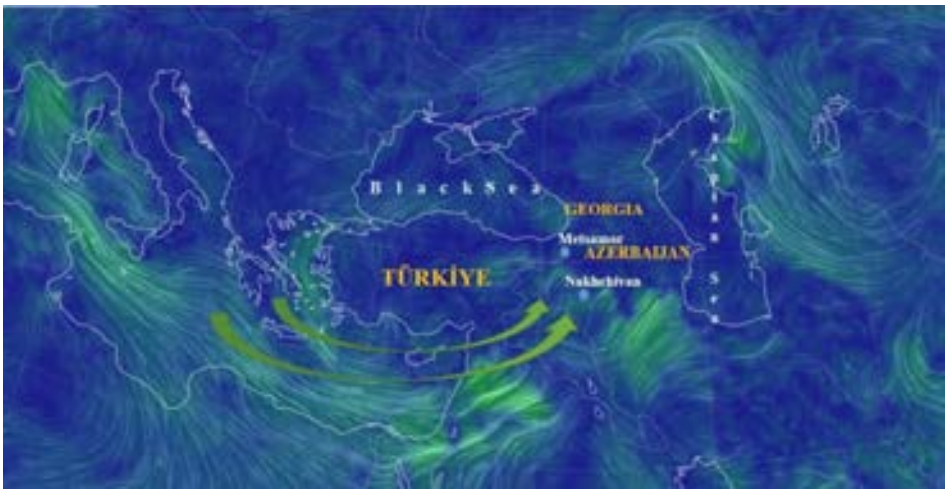


Fig. 3 B. Southern cyclones

have been purchased. This equipment is stored in the material and technical base of the Nakhchivan Autonomous Republic Ministry of Emergency Situations and is ready for use if necessary [3].

Studying the migration of radioactive substances in water bodies and the role of fish in this process. At the next stage of the research work, the dynamics of radionuclides in water bodies, the conservation of harmful substances and the role of fish in the migration of radioactive substances in water bodies were studied [1]. Surface waters are the second most important means of spreading radionuclides after atmospheric processes.

There are several sources of radioactive danger in the Aras River drainage basin. In addition to the MNPP, these include the Kacharan Ore Refinery (KOR) and the Radioactive Hazard Junction (RHJ) located in the Gayan Plain. Since the object of our study is the impact of the Metsamor NPP on the environment, we will not dwell on the others.

As a result of during the last eight years of research, it was observed that the level of radioactive substances in the Aras River exceeded the norm by 32 times [14]. Wastewater generated at the NPP may contain both trace levels of radionuclides and chemical contaminants, primarily detergents used in equipment decontamination and cleaning processes. The chemical composition of these effluents includes anionic surfactants, sodium hexametaphosphate, and related compounds. The main composition of detergents observed in the river water is anionic activated detergents, sodium hexametophosphate soap and others. Pollution of the atmospheric air, as well as the Aras River, also occurs through leakage from treatment systems, as a result of violation of the rules for storing radioactive waste, from the ventilation facilities of the MNPP, during waste deactivation and fuel regeneration. It should be noted that even if safety standards are fully observed at the NPP, the radius of influence of radionuclides through diffusion reaches up to 200 km. The radiation dose of the population living in the indicated area can vary from 0.1 to 60% [19].

Observations conducted since 1995 at the "Aras Water Junction" reservoir show that radioactive contamination material released directly and indirectly into the Aras River from the Armenian MNPP, especially the water used in the water cooling system, has a significant impact on many living creatures living there, especially fish, in addition to the river water.

The Aras reservoir is home to 26 species of fish and 17 species of crustaceans. According to the information received from the National Fish and Aquatic Resources Service the measured levels of radionuclides (Cs-137, Sr-90) in samples taken from ichthyofauna exceed the established norm for freshwater organisms (130-100 Bq-kg) [17]. Fish are contaminated with radioactive elements in various ways. These fish feed as a result of direct adsorption of radioactive substances accumulated in their bodies, as well as through water filtered through gills. Radioactive elements usually enter the internal organs through the skin, gills, and oral system. One of the main sources of contamination of fish with radioactive elements is through the food chain. Young fish and some older fish feed on plankton, and the amount of radionuclides in these plankton is 100 and even 1000 times higher than in the surrounding waters. Therefore, we believe that the main sources of contamination of fish are aquatic plants. Planktophages rapidly absorb pollutants from water. ^{54}Mn and ^{65}Zn are more efficiently transported in this way due to their biological functions in metabolic processes [21].

These elements accumulate in the shells and bones, while 60 Co is less common in this group because it does not bind strongly to plankton [30]. Radioactive substances entering internal organs and cells can also play the role of a source of secondary contamination.

Radionuclides, like other nuclides, enter the body through the alimentary system. The composition of natural radionuclides and ^{137}C has been studied by gamma-spectrometry. The activity concentration of ^{40}K is measured in the range of 44-165 Bq kg-1 [9]. Their accumulation in the body and their effect on the body depend on the type of food products and the state of the substance. While some nutrients are easier to regulate by the body, they are also easier to distribute in the body. Thus, radioactive substances in solid food are often not fully absorbed. In contrast, nutrients in ionic form are more easily absorbed by organisms. Fish are freed from radioactive elements in several ways: general body flushing, elimination of metabolic products from the body, and the decay and neutralization of radioisotopes.

Radiological effects are more clearly observed in some living organisms living in water bodies and are considered the main indicator [33]. The accumulation of radioactive substances in the body and cells of fish, as well as their distribution and excretion from the body, depends on many conditions. One of these conditions is the chemical properties of radioisotopes and their half-life, the type, age, physiological state and ecological conditions of the fish living in the water. The accumulation of radioisotopes in the body and cells of fish also depends on the concentration of radioisotopes in water and their time and period. Thus, this accumulation depends on changes in the water level at different times of the day and in different seasons and in the river.

Results. In the research work, the analysis of samples taken from the water of the Aras River and the corresponding analysis of fish as an ecological factor were used to determine the dynamics of radioactive waste released by the plant into the environment because this transboundary river basin creates shared geographic and hydrological pathways of environmental risk for regions along its course. Based on the results obtained, three ecological regions were identified and they were characterized separately. Pollution of the river basin with radioactive substances is a source of danger not only for the region, but also for the entire Caspian basin.

Also, an analysis of the tectonic processes that have occurred since 1980, including data on the strength, epicenter, and fault lines of earthquakes from the USGS website, was conducted in the region where the nuclear power plant, which was built to withstand a magnitude 7 earthquake, is located in a 8-magnitude tectonic zone, and is in an emergency state, and a seismic zoning map of the Republic of Armenia was prepared.Considering the structure and natural characteristics of the Aras river basin within the Nakhchivan Autonomous Republic, and the possibility of radioactive waste spread, it is possible to divide the territory of the basin into 3 different parts. Taking this into account, environmental vulnerability zoning of the Aras River basin has been prepared below (Figure 4).

The first part covers the upper reaches of rivers up to 2000-2200 m of absolute altitude. In this area, rivers are formed from small tributaries, springs, and snow waters, and flow in steep-sided valleys in the alpine and subalpine meadow zone. The waters are ecologically clean. No radioactive waste is found in this section (Table 3).

In the second part, rivers enter the middle mountainous zone, flowing rapidly through narrow and deep valleys, forming numerous rapids and waterfalls sometimes reaching a height of 20-30 m. This section covers areas of river basins at an altitude of 2200-2000 m and 1000 m. This section is subject to weak and very weak erosion. Traces of pollution are found after the flow of western winds (Table 3).

The third part includes the plain along Aras River located below 1000 m within the Nakhchivan Autonomous Republic. In this section, as the rivers enter the plain, their speed decreases significantly, their flows calm down, their beds expand and gradually merge with the surrounding relief. During the dry season of the year, due to arid climatic conditions and intensive use in agriculture, their tributaries often do not reach the Aras. Pollution is moderate. On the map, we have included the section from Sadarak to the Aras reservoir within the Nakhchivan Autonomous Republic as an ecologically stressed zone. This is due to the pollution of tributaries received from the territory of the Republic of Armenia by industrial and domestic sources, including radionuclides from the MNPP (Table 3).

The Aras reservoir plays a filtering role in the area. It is clear from the samples taken at the entrance and exit of the river into the reservoir that the amount of pollutants (phenols, heavy metals, nitrogen-phosphorus salts, etc.) in the water is different.

Floods in rivers occur mainly in the spring, as a result of snowmelt and heavy spring rains. Radioactive substances are rarely found during this period. The intensity of snowmelt, the absolute height of the feeding area, its shape and size have a serious impact on spring floods, as well as the degree of pollution [4].

Flash floods occur mainly in active river valleys and have great speed and destructive power. Water separates the sedimentary materials it brings mixed with it into components according to their volume, weight, and type and spreads them throughout the delivery cone. Flash floods are more widespread in the region and occur almost every year. However, structural floods that occur periodically cause greater destruction. Floods have a significant impact on the mechanical composition of the



Fig. 4. Environmental vulnerability zoning map of the Aras River basin in Nakhchivan Autonomous Republic

Table 3

Environmental vulnerability zoning of the Aras River system according to the degree of pollution

Zones of the river system according to the degree of pollution
Ecologically clean part
This includes the streams and river tributaries that enter the upper part of the Zangezur and Daralayaz mountains.
Relatively clean part
This includes the flow of the Aras River from the reservoir to the Okchuchay and its tributaries entering from the Zangezur (Alangez) mountain range.
Ecologically stressed region
The section from the confluence of the Aras River with the Arpachay River to the upper part of the "Aras Water Junction" reservoir. The main sources of pollution in the region are radionuclides from the Metsamor NPP and industrial and domestic waste entering through the Zangi (Razdan) River.

water of the Aras River [21]. The composition of waste entering the Aras River varies depending on the characteristics of the polluting source and changes in water volume, and manifests itself in three forms - dissolved, undissolved, and colloidal.

Wastes discharged into the Aras River system are divided into three groups according to their origin: mineral, organic and bacterial. Mineral-

origin pollutant concentrates consisting of various salts, suspended mechanical substances, and rock particles enter the water both naturally and anthropogenically [23]. The main components of organic waste are hydrocarbons, as well as carbon dioxide, nitrogen, phosphorus, potassium, sulfur, chlorine, etc. compounds. The bacteriological composition of the river is characterized by the presence of pathogenic and indicator bacteria in the water. In the water samples we took from the Aras River, EL-tor vibrios, which pose a special threat, were found twice, and Heiberg infection was found once. Mineral fertilizers and toxic chemical compounds, which are considered diffuse pollutants observed in the Aras River.

As a result of studies, it has been observed that the amount of radioactive substances and radionuclides entering the Aras River and the reservoir with the cooling water discharged from the MNPP, which is considered more dangerous from an ecological point of view, has recently decreased below the norm and sometimes completely disappeared. It should be noted that 12-163 tons of polluted water is discharged from the NPP into the river per day [24].

All harmful wastes affect the organic, sanitary, toxic, etc. qualities of the river water, changing its many physical properties, color and transparency. In parallel with this, the amount of dissolved oxygen in the water changes, eutrophic processes intensify, the hydrochemical and hydrobiological regime of the water is disturbed, and its quality decreases[11]. The increase in bioproductivity disrupts the general balance of the ecosystem in the water and its restoration cannot occur for many years.

Analysis of water samples taken from various parts of the Aras River, its tributaries and the reservoir shows that the ecological tension reaches its maximum in August-September, when the water level drops to a minimum [6].

During these periods, it has been recorded that the levels of some substances in the water, such as phenol, ammonia, nitrates, and nitrogen, are 500 times higher than normal. On the other hand, as a result of the sharp drop in water level, thermal circulation in the water is disrupted, and the specific gravity of pollutants increases due to the decrease in volume and water consumption, as a result, the water heats up rapidly and favorable conditions are created for the development of parasites in some fish species.

The percentage of pollutant concentrations decreases sharply during the months of March-May, when the levels are at their maximum (Table 4) [14].

Below is an analysis of water samples taken from different locations for comparison.

The “Aras Water Junction” reservoir can be divided into the following 4 regions according to its ecological status.

Table 4

Analysis of water samples taken from different locations

Water composition and temperature	The limit of the norm	Arpachay	Aras (Near Sadarak)	Aras Canal	Water Reservoir (Platina)	Reservoir (upper part)
Water temperature, C^0	-	13.1	13.4	16	22.4	23
PN	6.8-8.5	8	7	8	9.2	9.1
Transparency (sm)	30	25	25	23	18	19
Chloride (mg/l)	300-350	35.445	70.89	63.16	90.38	170.14
Sulfate (mg/l)	100-500	-	-	462	147.72	686.88
Acidity-alkalinity (mg/l)	-	109.84	103.71	118.98	91.53	175.99
Calcium (mg/l)	180	200.4	160.32	168.09	59.09	152.30
Magnesium (mg/l)	90	121.6	48.64	36.44	58.97	84.51
Potassium (mg/eq/l)	7.00	20	12	11.1	7.3	14.55
Nitrite (mg/l)	0.08	0.001	0.004	0.004	0.02	0.04
Nitrate (mg/l)	9.1	1.0	1.0	0.5	1.0	1.2
Ammonium (mg/l)	0.05	0.08	0.04	0.08	2.0	8.00
Dry residue (mg/l)	1000	0.888	0.038	1223.5	472.5	1610
Suspended matter (mg/l)	0.75	0.09	0.01	23.85	28.3	227.45
Radioactive contamination	0.1-1.0	-	1.4	-	-	-

Platina-dam region. The physicochemical indicators of the water in the part of the reservoir near the dam, its color, transparency, amount of suspended matter and water circulation differ from other areas. This zone is considered ecologically clean and radioactive elements are almost not found in the water or are found only in the internal organs of fish migrating here, which is below the norm. There is no long-term accumulation of radioactive elements in the skin of fish.

Transition region. Pollution in this region is seasonal, the level of radioactive and heavy metals reaches a maximum in the summer months. During periods of abundant water, when the level is high, the amount of radioactive elements is the lowest. This usually coincides with periods of abundant precipitation, as well as active snow melting. Although the total amount of radioactive elements in water is high, it is low in terms of their amount per unit volume.

Delta region. The physicochemical properties of the waters are identical to the properties of river waters. Unlike the dam region, radioactive elements can be found in the skin of some fish, and bottom-dwelling fish are not found in the dam region. The region is shrinking due to river discharges, and in turn, its area is increasing due to the transition region. Due to river discharges, the reservoir has shortened by 19 km in the delta region. Radioactive waste is found in the alluvial sediments collected here, as in the water body. These wastes enter the Aras River, and from there to the delta region with the waters of the cooling system discharged from the NPP. Radioactive waste collected in the sediments decomposes and neutralizes over time.

Coastal region. The accumulation of harmful substances in this region is mainly seasonal. During the mezhe period of the river and in the hot summer months when the reservoir water is used for irrigation, radioactive and heavy metal pollution reaches its maximum. Radioactive elements are found in the sediments in the delta region, and their amount and accumulation are out of general regularity. Thus, the accumulation of radioactive elements in river water depends on its direction in the reservoir, the amount of water entering the reservoir, the temperature of the water, and others.

Radioactive elements in sediments are found in the delta region, and their amount and accumulation are not consistent with general laws. Thus, the accumulation of radioactive elements varies depending on the direction of the river water in the reservoir, the amount of water entering the reservoir, the water temperature, and in fish, along with these conditions, the direction of their migration. Also, as mentioned above, the amount and time of waste discharged from the NPP into the river affect the composition of the collected materials. Toxic compounds released into the aquatic environment from natural and anthropogenic sources are absorbed by aquatic organisms. Even low levels of toxic metals can threaten the health of aquatic organisms and humans [13]. When studying radioactive substances in fish, it is necessary to approach this issue from two directions. The first is the effect of fish as carriers of radioactive substances that have entered their bodies, and the second approach is the study of the impact of radioactive substances released from their bodies on the environment and their study. It should be noted that the contamination of fish in the basin with radionuclides and heavy metals is a source of danger not only for the Nakhchivan autonomous republic, but also for all the living creatures of the Caspian water area and the basin states [5]. In our opinion, the solution of the second problem is more relevant. As noted, radioactive elements enter their internal organisms through the skin, gills and mouth. Young fish accumulate more radioisotopes in their bodies than older fish. In addition to the above factors, the accumulation of radionuclides is also affected by the season and periods of the year. According to ecologist N.I. Bulyamov (1983), the accumulation of radionuclides in the body also depends on the mineralization of water and its chemical composition. Of course, the effect of water temperature is great here. This is proven by the samples we took from the same test point in the reservoir at different times. In our opinion, much depends on the type of fish and its physiological activity. Thus, fish that lead an active life can accumulate more radioactive elements. When active fish move from the dam area, which we consider ecologically clean, to other areas of the reservoir, the process of accumulation of elements is activated in them. Analysis of samples taken from catfish (Silurus glanis) that have an underwater lifestyle during the cold period in the transition region in different years shows that radionuclides are almost absent in this type of fish that lead a bottom life. In the delta region, the most radioactive isotopes accumulate in bottom-dwelling fish.

Radioactive elements entering the water first accumulate in invertebrates, aquatic invertebrates and aquatic plants, which are the main food of fish. The decrease in radioactive elements in them also affects fish. Considering the ratio of the mass of water in the food to the total mass, the most radioactive isotopes accumulate in aquatic plants. This is also due to the lack of solid waste, that is, solid substances, in plants during the vegetation period.

Conclusion. As a result, the MNPP is a serious source of danger for the region, as it is located on a 8-magnitude earthquake zone and the Anatolian fault line and has reached the end of its operational life. The waste released into the atmosphere by the

plant and spread through the water cooling system, taking into account the movement of air masses and relief features, may cause the formation of radioactive contamination zones in the territory of the Nakhchivan Autonomous Republic.

Since the air masses entering the Nakhchivan Autonomous Republic pass over the Metsamor Nuclear Power Plant at different times of the year or regularly, any minor accident or radioactive leakage will cause isotherm (vertical stability of the air) and wind speed to cause contamination of ecosystems with radionuclides. In this case, the radiation dose rate is expected to be in the range of 0.001 R/hour-0.007R/hour, which is 700 times higher than the daily radiation background.

Analysis of water samples taken from different points shows that many physical, chemical and biological indicators in the water in the area exceed the established norms, and these indicators vary depending on the water level in the seasons. This is proven by the samples we took from the same testing point in the reservoir at different times.

Taking into account the structure and natural characteristics of the basins, the impact of radioactive waste, it is more correct to divide the Aras River basin into three different parts (ecologically clean part, relatively clean part, ecologically stressed region) in the Nakhchivan Autonomous Republic.

The accumulation of radioactive substances in ichthyofauna has been studied in two directions. The first of these is as a carrier of radioactive substances that have entered the organisms of fish, and the second approach is the study of the impact of radioactive substances released from their bodies on the environment and their impact. The solution of this problem is more relevant.

The results of research conducted in different years show that the greatest accumulation of elements is in the catfish (Silurus glanis) and perch (Perca fluviatilis L.) fish.

References

1. *Amanova, S., Hajiyeva, A., Jafarova, F. (2024). Preparation of future development scenarios of urban landscapes in accordance with natural and socio-economic conditions (on the example of the cities of the Kura-Araz lowland). Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology", (60), 305-322. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-22*
2. *Amanova, S.S., Hajiyeva, G.N., Najafov, J. S., Ibrahimova, L.P. (2024). Investigation of urban biodiversity and factors influencing it based on modern technologies. Geodesy and Cartography, 50(3), 141–149. https://doi.org/10.3846/gac.2024.19626*
3. *Atlas of Emergency Situations of the Nakhchivan Autonomous Republic, 2017.*
4. *Bababeyli N.S., Fatih I.M. (2009). Ecological conditions of the upper reaches of the Araz river system. Nakhchivan: Ajami, 212.*
5. *Bababeyli, N.S., Imat, F.M., Ozdemir, M. (2010). On the role of atmospheric circulation in the spread of radioactive waste in the Araz River basin. VII Azerbaijan International Geophysical Conference, 135-142.*
6. *Bababeyli, N.S., Imat, F.M., Ozdemir, M. (2014). Environmental degradation of radioactive sources (Metsamor Nuclear Power Plant). Geresun University Institute of Social Sciences. Black Sea Social Sciences journal, 1(2), 105-123.*
7. *Baghirova, A. (2018). Energy security issue and nuclear power plants: example of Metsamor nuclear power plant. Turkish World Studies, 120(2), 215-232.*
8. *Bilgiç, E. (2016). Atmospheric dispersion of radiation originating from nuclear power plant accidents (Master's thesis, Dokuz Eylül University, Graduate School of Natural and Applied Sciences).*
9. *Biljana, M., Jelena, M.S., Natasa, S., Pucarevic, M., Strbac, S. (2019). Evaluation of heavy metals and radionuclides in fish and seafood products. Chemosphere, 229, 324-331. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.189*
10. *Burjan, T., Schwemin, B., Erben, U., Halbritter, A., & Trubnikow, W. (2001, January). Dynamic analysis and safety measures of VVER-440 NPP Paks 1 to 4 due to seismic and operational loading conditions. In International Youth Nuclear Congress 2000: Youth, Future, Nuclear. Proceedings and Multimedia Presentation (No. INIS-SK-2002-01, p. 6-6).*
11. *Chernogor, L., Nekos, A., Titenko, G., Chornohor, L. (2024). Ecological consequences of the catastrophic destruction of the Kakhovka reservoir dam. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology", (61), 399-410. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-32*
12. *Elnara Y. Seyidova, Turkana A. Aliyeva, Naila Z. Aliyeva. (2024). Economic-geographic problems of the socio-economic development of the Nakhchivan Autonomous Republic in the modern stage. Journal of Geology, Geography and Geoecology. 33(4), 830-839. https://doi.org/10.15421/112475*
13. *Gu, Y.G., Lin, Q., Huang, H.H., Wang, L.G., Ning, J.J., Du F.Y. (2017). Heavy metals in fish tissues/stomach contents in four marine wild commercially valuable fish species from the western continental shelf of South China Sea. Marine Pollution Bulletin, 114(2), 1125-1129. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.10.040*
14. *Hydrometeorological Center operating under the Ministry of Ecology and Natural Resources, https://eco.gov.az/az/fealiyyet-istiqametleri/hidrometeorologiya/merk ezler/hidrometeorologiya-merkezi*
15. *International Atomic Energy Agency. (2005). Experience gained from fires in nuclear power plants (IAEA-TECDOC-1421). IAEA.*
16. *International Atomic Energy Agency (IAEA). (2022). Nuclear technology review 2022: Report by the Director General (GC(66)/INF/4). IAEA.*
17. *Nakhchivan Autonomous Republic Food Safety Agency, https://nfsa.gov.az/en*

18. Karahan, G., Kapdan, E., Bingoldag, N., Taskin, H., Bassari, A., & Ata, A. T. (2020). Environmental health risk assessment due to radionuclides and metal(loid)s for Igdir province in Anatolia, near the Metsamor nuclear power plant. International Journal of Radiation Research, 18(4), 863–874.
19. Karakash, A., Gurler, D., Atalay, B., Arıkan, M., Karakoch, Y., Shafak, G., Yukruk, F.A. (2007). Subungual Exostosis: A Case Report. Acta Ongologica Turcica, 40, 33-36.
20. Karakhanian, A. S., Trifonov, V. G., Philip, H., Avagyan, A., Hessami, K., Jamali, F., Bayraktutan, M. S., Bagdasaryan, H., Arakelyan, S., Davtian, V., & Adilkhanyan, A. (2004). Active faulting and natural hazards in Armenia, eastern Turkey and northwestern Iran. Tectonophysics, 380(3–4), 189–219. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2003.09.020
21. Kaunelienė, D. (2014). Features of 137 Cs and 60 Co accumulation in fish of Lake Drūkšiai and its numerical modeling. Zool. Ecology, 24, 177–184. https://doi.org/10.1080/21658005.2014.925235
22. Khalilov, I., Eminov, F. (2024). Against the background of global climate changes, the current ecological situation of Azerbaijan's water resources and the directions of efficient use. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology", (61), 392-398. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-31
23. Mammadov, A., Abdullayev, A. (2024). The main causes of soil contamination with heavy metals (Pb, Cd, Hg) on the northeastern slope of the Lesser Caucasus of the Republic of Azerbaijan. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology", (61), 358-368. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-28
24. Mammadov G., Khalilov M. (2004). Ecology and environment. Baku: Elm, 504
25. Mansiyev, G. G., & Bayramov, A. A. (n.d.) (2014). Analysis of accidents at several nuclear power plants and radiation safety of the population of Azerbaijan. Military Academy of the Armed Forces.
26. Medvid, H., Yanush, L., Solovey, T., Harasymchuk, V. (2024). Groundwater pollution risks assessment in Ukraine-Poland transboundary aquifers. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology", (61), 64-75. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-05
27. Nadirov, R., Rzayev, O. (2017). The Metsamor Nuclear Power Plant in the Active Tectonic Zone of Armenia is a Potential Caucasian Fukushima. Journal of Geoscience and Environmental Protection, 5(4), 156-163. https://doi.org/10.4236/gep.2017.54005
28. Saenko, V., Ivanov, V, Tsyb, A, Bogdanova, T., Tronko, M., Demidchik, Y., Yamashita, S. (2011). The Chernobyl Accident and its Consequences. Clinical oncology, 23, 234-43. https://doi.org/10.1016/j.clon.2011.01.502
29. Seyidova, E., Aliyeva, T., & Zeynalli, L. (2025). The impact of climate factors on agricultural development: ARDL bounds test approach. Agricultural and Resource Economics: International Scientific E-Journal, 11(4), 127–152. https://doi.org/10.51599/are.2025.11.04.05
30. Nataliia, E., Zarubina, V.S., Liliia, P.P., Oleg, S.B. (2025). Content of Short-Lived Radionuclides (54Mn, 60Co, and 65Zn) in Fish. Fishes, 10(3), 90; https://doi.org/10.3390/fishes10030090
31. Nuclear Technology Review. Report by the Director General. İAEA-2022. https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc66-inf4.pdf
32. Tomczyk, J. (2019, July 22). The past, present, and uncertain future of the Metsamor nuclear power plant. EVN Report. https://old.evnreport.com/economy/the-past-present-and-uncertain-future-of-the-metsamor-nuclear-power-plant
33. Voitsekhovych, O., Kanivets, V., Onishi, Y. (2007). The Chernobyl Accident and Its Aquatic Impacts on the Surrounding Area, Chernobyl - What Have We Learned? https://doi.org/10.1007/1-4020-5349-5_2
34. World Nuclear Association. (WNA, 2022). Nuclear power in Armenia. https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/armenia
35. Yoshikane, T., Yoshimura, K., Chang, E.-C., Saya, A., & Oki, T. (2016). Long distance transport of radioactive plume by nocturnal local winds. Scientific Reports, 6, 36584. https://doi.org/10.1038/srep36584
36. Yoshikane, T., & Yoshimura, K. (2018). Dispersion characteristics of radioactive materials estimated by wind patterns. Scientific Reports, 8, 9926. https://doi.org/10.1038/s41598-018-27955-4
37. Zarubina, N. E., Semak, V., Ponomarenko, L. P., & Burdo, O. S. (2025). Content of short lived radionuclides (54Mn, 60Co, and 65Zn) in fish. Fishes, 10(3), 90. https://doi.org/10.3390/fishes10030090
38. Zhuzzhassarova, G., Azarbayjani, F., Zamaratskaia, G. (2024). Fish and Seafood Safety: Human Exposure to Toxic Metals from the Aquatic Environment and Fish in Central Asia. International Journal of Molecular Sciences, 25(3), 1590. https://doi.org/10.3390/ijms25031590
39. The 'dark' failure of Metsamor NPP in 1982, News.Az International. URL https://news.az/news/the-dark-failure-of-metsamor-npp-in-1982
40. Armenia, World Nuclear Association. URL: http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/armenia.aspx
41. Chernobyl Accident 1986, World Nuclear Association. URL: https://world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/chernobyl-accident
42. The city in the shadow of an ageing nuclear reactor, British Broadcasting Corporation. URL https://www.bbc.com/worklife/article/20190527-the-city-in-the-shadow-of-an-ageing-nuclear-reactor
43. Nuclear Power in Armenia, World Nuclear Association. URL: https://world-nuclear.org/Information-Library/Country-Profiles/countries-A-F/Armenia
44. 1990s Armenian energy crisis, Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/1990s_Armenian_energy_crisis

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Оцінка ризику небезпеки Мецаморської атомної електростанції (АЕС) у Нахчиванській автономній республіці

Ельнара Сеїдова [1]
д. пед. н., завідувач кафедри географії,
[1] Нахчиванський державний університет, Нахчивань, Азербайджан;
Нармін Салманлі [1]
аспірант (географія), викладач кафедри географії;
Гюльтен Кара [2]
д. філософії (картографія), викладач кафедри інженерної геоматики,
[2] Караденізський технічний університет, Трабзон, Туреччина;
Нурлана Ганбарова [1]
викладач кафедри географії

Метою дослідження є вивчення процесів атмосферного розсіювання, а також оцінка впливу радіоактивних скидів на навколишнє середовище у зв'язку з розташуванням реакторів МНПП у прикордонному регіоні з високим сейсмічним ризиком та дослідження можливого перенесення забруднюючих речовин до Нахчиванської Автономної Республіки повітряними потоками та річкою Аракс. Дослідження охоплює просторовий аналіз транскордонних радіоекологічних небезпек у басейні річки Аракс, заснований на зборі гідроекологічних зразків у польових умовах, лабораторному аналізі води та іхтіофауни, геоінформаційному картографуванні та комплексній оцінці сейсмотектонічних ризиків. У зразках води досліджувалися фізико-хімічні, мікробіологічні та біологічні параметри (pH, важкі метали, нітрати, фосфати, вміст кисню тощо), а рибу використовували як біоіндикатори для оцінки довгострокового накопичення радіонуклідів. Крім того, за допомогою програмного забезпечення ArcGIS (ArcMap) вивчали фактори ризику тектонічних процесів, що відбувалися та можуть відбуватися в цьому районі, та підготували карту екологічного зонування частини басейну річки Аракс. Вперше в Нахчиванській Автономній Республіці оцінено радіологічний ризик, пов'язаний з Мецаморською АЕС, на основі комплексного регіонального аналізу атмосферного переносу, річкового розсіювання та біологічної міграції радіоізотопів. В останні роки було проведено екологічне зонування та підготовлено карту, що ілюструє вплив АЕС Мецамор на басейн річки Аракс та водосховище Аракс. Новизна дослідження полягає в розробці просторової моделі транскордонного екологічного ризику в басейні річки Аракс, що базується на інтеграції гідрохімічних показників, даних біотичного накопичення та аналізу сейсмічної небезпеки. Дослідження визначило, що основними шляхами розсіювання радіонуклідів є річка Аракс, атмосферна циркуляція та міграція риб. Беручи до уваги потенційне розсіювання радіоактивних відходів у басейні, річки району були розділені на три категорії за їх екологічним станом: чисті, відносно чисті та сильно забруднені. Карта, складена за допомогою ArcMap, підтверджує сейсмічний ризик району, показуючи, що за останні 45 років з початку роботи АЕС було зареєстровано сотні землетрусів з максимальною магнітудою 7. Екологічний ризик, який становить Мецаморська атомна електростанція для регіону, було визначено на основі комплексного аналізу шляхів міграції радіонуклідів в атмосферному, гідрографічному та біологічному середовищах, а також комплексної оцінки гідрохімічних, біотичних та сейсмічних показників у басейні річки Аракс.

Ключові слова*: Атомна електростанція (АЕС), Мецамор, радіоактивні витоки, радіологічне забруднення, атмосферна циркуляція, сейсмотектонічний ризик, радіонукліди, Нахчиванська Автономна Республіка, річка Араз, екологічне зонування.*

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу
Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 19 травня 2025 р.
Прийнята 18 листопада 2025 р.

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-45
УДК [504.06:001.891]:316.42

Надійшла 1 вересня 2025 р.
Прийнята 9 жовтня 2025 р.

Ноосферне бачення концепції сталого розвитку

Сергій Сонько [1]
д. геогр. н., професор, кафедра екології та безпеки життєдіяльності,
[1] Уманський національний університет, Умань, Україна,
e-mail: sp.sonko@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7080-9564;
Надія Максименко [2]
д. геогр. н., професор, зав. кафедри екологічного моніторингу та заповідної справи,
[2] Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна,
e-mail: maksymenko@karazin.ua, http://orcid.org/0000-0002-7921-9990

Вважається, що на теперішній час концепція сталого розвитку зазнала повного фіаско, оскільки згенерувати реалістичну парадигму соціоприродного розвитку ноосфери майже не можливо. Замість початкового обмежувального змісту сучасна вже «стратегія» сталого розвитку з 17 цілей містить лише три, дійсно наближені до високих ідеалів Ріо-92. Решта ж орієнтована на інтенсифікацію економічного розвитку за рахунок природних ресурсів планети. Мета статті: дослідження сучасних тенденцій впровадження концепції сталого розвитку в реальні дії, дискусія щодо її дієздатності та презентація авторської реально діючої концепції ноосферних екосистем як шляху до сталого розвитку. В основу дослідження покладено аналіз фундаментальних природничо-наукових праць, величезних масивів даних з просторової організації сільського господарства Харківської та Черкаської областей, результати попередніх досліджень. Крім традиційних методів географічних та екологічних досліджень широко використовувався картографічний метод, зокрема авторська методика елементарних ГІС (ЕГІС), історико-географічні та історіософські розвідки, моделювання та розробка можливих сценаріїв розвитку соціо-природної взаємодії. Інтерпретація ознак глобальної екологічної кризи в процесі еволюції розглянута в історичному розрізі. Констатується, що формування глобальної екологічної кризи завдячує існуванню неузгодженості територіальних комбінацій різного рівня екосистем – урбо- , агро- і інфраекосистем. Основною причиною недієздатності концепції сталого розвитку є неправильне позиціонування людини, як біологічного виду в межах біосфери. Обгрунтовано, що межі «екотопу» Homo Sapiens значно перевищують межі, що природньо можуть забезпечити існування конкретного організму, а перетікає на наступний - екосистемний рівень. В наслідок цього формується екологічна ніша з мінливими межами – агроекосистема. Аналіз еволюції агроекосистем Харківської області за 30-річний період, свідчить, що саме просторова неузгодженість територіальних комбінацій ноосферних екосистем викликала загострення екологічної проблеми, яка має рівень глобальної. Можливим способом гармонізації соціо-природної взаємодії може стати просторове чергування (ротація) функцій сільськогосподарських та міських екосистем, зберігаючи при цьому сполучні функції інфраекосистем при контактному (а не бар'єрному) типі кордонів. Авторами запропонована модель, заснована на принципі просторової ротації, головний напрямок взаємодії природи і суспільства в якій докорінно змінюється з антропоцентричного на адаптований.

***Ключові слова**: агроекосистема, урбоекосистема, інфраекосистема, біосфера, сталий розвиток, ноосфера, природокористування, екологічна ніша, антропогенез.*

Як цитувати: Сонько Сергій, Максименко Надія (2025). Ноосферне бачення концепції сталого розвитку. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*, (63), 604-618. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-45
In cites: Sonko Segiy, Maksymenko Nadiya (2025). Noospheric vision of the concept of sustainable development. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 604-618. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-45 [in Ukrainian]

Постановка проблеми. «Людство веде війну проти природи», – заявив Генеральний секретар ООН Антоніу Гутерріш державам-членам під час відкриття Саміту ООН з біорізноманіття 30 вересня 2020 року, – «і одним із наслідків є поява смертельних хвороб, таких як ВІЛ/СНІД, Ебола та COVID-19» [1]. Глобальна пандемія COVID-19 – це ще одне нагадування про необхідність переосмислення взаємодії людей з природою [2]. Наведений вище вислів, а також численні праці, присвячені доцільності/хибності ідей сталого розвитку [3-10] роблять цю проблему дедалі більш актуальною.

Після довготривалих дискусій, які стосуються головних цілей сталого розвитку, відповідь на найголовніше запитання природокористування щодо зростаючого рівня загострення глобальної екологічної проблеми стає дедалі більш актуальною. Така відповідь стає дедалі більше невизначеною замість остаточної. Це відбувається, передусім, тому, що «вбудований у неоліберальну ринкову раціональність та просуваний під маркою екомодернізму, сталий розвиток поверхово обіцяв квадратуру кола між економічним зростанням та захистом навколишнього середовища, завжди будучи більш прихильним до економічного розвитку» [10-13].

Проте, незважаючи на намагання політизувати, а, скоріше, популізувати високі ідеали сталого розвитку у напрямку економічних пріоритетів, особливо для країн глобального Півдня, головні орієнтири цієї концепції залишаються непорушними. Зокрема, ця концепція наголошує лише на тих потребах людини, які можуть бути реалізованими у тих економічних секторах, які використовують біоресурси. І це сільське та лісове госпо-

© Сонько Сергій, Максименко Надія, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

дарство, видобуток морепродуктів, частково енергетика [14]. При цьому, найважливішою потребою людини є доступ до достатніх продовольчих та водних ресурсів. Тому зростаюче та дедалі багатше населення світу, перш за все, вимагає зростаючого та сталого світового виробництва продуктів харчування. «Доки сільськогосподарські екосистеми залишаються достатньо продуктивними, значну частину проблем існування людини можна вважати вирішеною» [15].

В пошуках першопричин сьогоднішньої недієздатності стратегії сталого розвитку, одним з авторів була розроблена концепція ноосферних екосистем, витоки якої виходять ще з досліджень просторової організації сільського господарства (1985 р і по сьогодні). Вона намагається дати відповідь на головне запитання в тріаді: «Що відбувається?», «Хто винен?» і «Що робити?». І, на наше глибоке переконання, головним в цій тріаді є запитання не «Що робити?», а «Що відбувається?». Бо без коректної відповіді саме на нього ми не зможемо знайти відповідь на запитання «Що ж робити?».

Серед наголошених найлегше можна знайти відповідь на запитання *«Хто винен?».* Звісно ж, людина з її непомірними потребами щодо споживання природних ресурсів. Власне, через це і стартував багаторічний челендж під назвою «Ріо-1992». На питання *«Що відбувається?»* відповідають високі ідеали концепції сталого розвитку з ключовим гаслом щодо ресурсів для майбутніх поколінь. А ось на запитання *«Що робити?»,* шукає відповідь стратегія сталого розвитку починаючи з 2015 року [16]. Причому її розробники не дуже замислювались над науковою коректністю цієї стартегії, в якій із 17 позначених цілей лише 3 відповідають духу і головним намірам Ріо-1992. Це – «збереження екосистеми суші», «збереження морських ресурсів», та «відповідальне споживання». Решта ж цілей стосуються переважно економічного розвитку, який неможливий без подальшої нещадної експлуатації ресурсів планети [17].

Автори переконані в тому, що приховані суперечності будуть вирішені «поверненням» виду Homo sapiens до біосферної організації на природних еколого-економічних принципах. Тобто «злиття» з біосферою не лише людської економіки, а й усього буття, є цілком реальною процедурою, яка, тим не менш, потребує від Homo sapiens ідентифікувати себе як біологічний вид. Усвідомлення людиною свого нерозривного зв'язку з природою можливе лише тоді, коли людина, яка живе на планеті Земля зрозуміє, що ніколи не зможе дистанціюватися від матеріальних та енергетичних потоків біосфери, і, отже, тоді можна почати говорити про ноосферу/сталий розвиток [18,19].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сталий розвиток та роль, яку відіграє довкілля та охорона природи в цьому дискурсі, розглядається з точки зору його безпосередньої корисності для існування людства [12].

Існує приблизно три можливі позиції. *Антропоцентричне* визначення вважає природні екосистеми цінними лише доти, доки вони допомагають задовольнити потреби людини. *Екоцентричний погляд* розглядає природу як таку, що має внутрішню цінність, незалежну від її корисності для людини та потребує захисту сама по собі. Акцент на *екосистемі* знаходиться десь посередині. Багато хто в міжнародній спільноті сприйняв його як прагматичний робочий підхід: потреби людини важливі, але глобальна мережа екосистем – це більше, ніж сума її економічно корисних частин [20]. Різницю між внутрішньою цінністю та екосистемною орієнтацією іноді також називають або глибокою або поверхневою «зеленістю» [21].

Насправді, екосистемна орієнтація спричинила появу великої кількості літератури про те, як оцінювати функції використання та невикористання навколишнього середовища для обґрунтування інвестування в охорону природи. У багатьох випадках можна показати, що цінність екосистемних послуг, що накопичується з часом, значно перевищує цінність одноразового видобутку ресурсів, наприклад, від вирубки лісів, яка, крім реалізації інших екосистемних послуг [22, 23], знищує критично важливі середовища існування незліченних видів рослин і тварин [24]. В інших випадках невикористовувану цінність, що перевищує корисну, не так легко встановити. В будь-якому випадку, рішення щодо приватних інвестицій часто зумовлені радше короткостроковими можливостями отримання прибутку, ніж довгостроковими міркуваннями, що сприяє гребуванню екосистемною динамікою, на відміну від сталого управління споживанням ресурсів. Тому оцінку екосистем слід розглядати здебільшого як політичний інструмент, а не як основу для інвестиційних рішень [12].

Теоретичне значення цих різних визначень сталого розвитку вздовж антропоцентричної та екоцентричної вісі є неперетинним. Наприклад, теоретично можна уявити світ, який може підтримувати людське життя з висококерованими продуктивними екосистемами з використанням генетично модифікованих рослин. Такий штучний світ майбутнього може бути здатним підтримувати людське життя в сукупності, особливо в міру того, як покращуватиметься здатність людини керувати природними екосистемами. Однак з такого аналізу на сукупному рівні ви-

ключається не лише доля дикої природи, але й те, як вирішуються питання справедливого розподілу природних ресурсів у всьому світі [25].

З іншого боку, є ідеальний світ майбутнього, в якому весь розвиток та перетворення решти природних екосистем припинилися. Людство продовжуватиме зростати в межах природних кордонів без будь-якого подальшого перетворення навколишнього середовища. Багатосторонні обговорення стосуються того, де знаходиться людство між цими двома баченнями і до чого воно має схилитися. Як на це відповісти, є радше політичним, ніж науково-технічним та економічним питанням [12].

На наше глибоке переконання означені протиріччя вирішаться шляхом «вбудовування» в біосферу не лише людського господарства, а й усього буття виду *Homo Sapiens.* Вести мову про ноосферу чи сталий розвиток стане доцільним лише після усвідомлення того, що людина є частиною речовинно-енергетичних потоків біосфери [19]. **Мета статті**: дослідження сучасних тенденцій впровадження концепції сталого розвитку в реальні дії, дискусія щодо її дієздатності та презентація авторської реально діючої концепції ноосферних екосистем як шляху до сталого розвитку.

Матеріали та методи дослідження. Крім фундаментальних природничо-наукових праць автори користувались величезними масивами даних з просторової організації сільського господарства Харківської та Черкаської областей, результатами як власних попередніх досліджень, так і досліджень своїх учнів (переважно аспірантів).

Крім традиційних методів географічних та екологічних досліджень широко використовувався картографічний метод, зокрема авторська методика елементарних ГІС (ЕГІС), історико-географічні та історіософські розвідки, моделювання та розробка можливих сценаріїв розвитку соціо-природної взаємодії.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Розвиток нашої планети похідний від енергоінформаційних процесів Всесвіту. Протягом певного періоду часу на нашій планеті створено фіксовану кількість речовини та енергії (відповідний закон В. І. Вернадського).

У майбутньому, як із залученням процесів космічної природи, так і популяцій біоти, перетворення речовини буде здійснюватися шляхом її перерозподілу на денній поверхні планети. Найбільш інтенсивно такий перерозподіл здійснюють людські популяції [18].

Згідно закону екологічного мутуалізму, заповнення простору в природній системі організовано шляхом такої взаємодії між її складовими так, що дозволяє реалізувати її гомеостатичні властивості з мінімальним протистоянням між підсистемами.

Це означає, що ворожий компонент, введений у систему людиною, буде знищений самою системою, або знадобляться додаткові джерела енергії для підтримки його присутності в системі. Саме через використання надлишкових джерел енергії людина порушує закон екологічного порядку. Це доводить просторову «вбудованість» популяцій Homo sapiens у біосферний простір. Отже, людські популяції біоекологічно повинні мати своє унікальне екологічне середовище існування (нішу), яке можна відстежувати як у просторі, так і в часі. Для людини цією нішею може стати сільськогосподарська екосистема (рис. 1) [26].

Аназізуючи механізм формування агроекосистеми, слід зауважити, що основною ознакою формування соціуму і усвідомлення людиною еволюції свого виду є не створення соціокультурної надетнічної системи [27], а формування аграрної екосистеми, яка може розвиватись у просторі і часі завдяки людині і на потребу людини. Таким чином, еволюцію біологічного виду *Homo Sapiens* доцільно розглядати з точки зору екосистемології.

Еволюція сільськогосподарських екосистем у географічному просторі відбувається внаслідок «розповсюдження» сільськогосподарських культур по поверхні Земля. За М.А. Голубцем [28], пам'ять живих систем виконує також їхню кібернетичну організуючу функцію, тобто забезпечує їх самоорганізуючий ефект. Таким чином, агроекосистема містить «пам'ять» колишньої біосфери, яка свого часу була структурно та інформаційно незмінною. Згідно із сучасними уявленнями про ризому [29], такою «пам'яттю» може бути педосфера планети з ризоматичними нейронними зв'язками, які, на думку авторів, контролюють біосферні механізми. Схожі уявлення були представлені в концепції Геї [30], в теорії біотичної регуляції [31], значенні духовного розвитку [32],

Ця «пам’ять» на рівні сільськогосподарських систем забезпечує саморегуляцію «екологічної ніші Homo sapiens», ефективно керуючи чисельністю людської популяції (пандемії, війни, дефіцит продовольчих ресурсів тощо) та опосередковано впливаючи на глобальну просторову структуру. Зокрема, підтримуючи стабільне співвідношення між сільськогосподарськими зонами з «натуральним» та «ринковим» сільським господарством.

Ми простежили процес від тріумфальної появи Стратегії сталого розвитку до занепаду вже в Йоганнесбурзі (2002) і абсолютного краху на «Ріо+20» (2012). Насправді, «притягнуті» в Йоханнесбурзі до початкових обмежувальних орієнтирів концепції сталого розвитку (Ріо-1992)

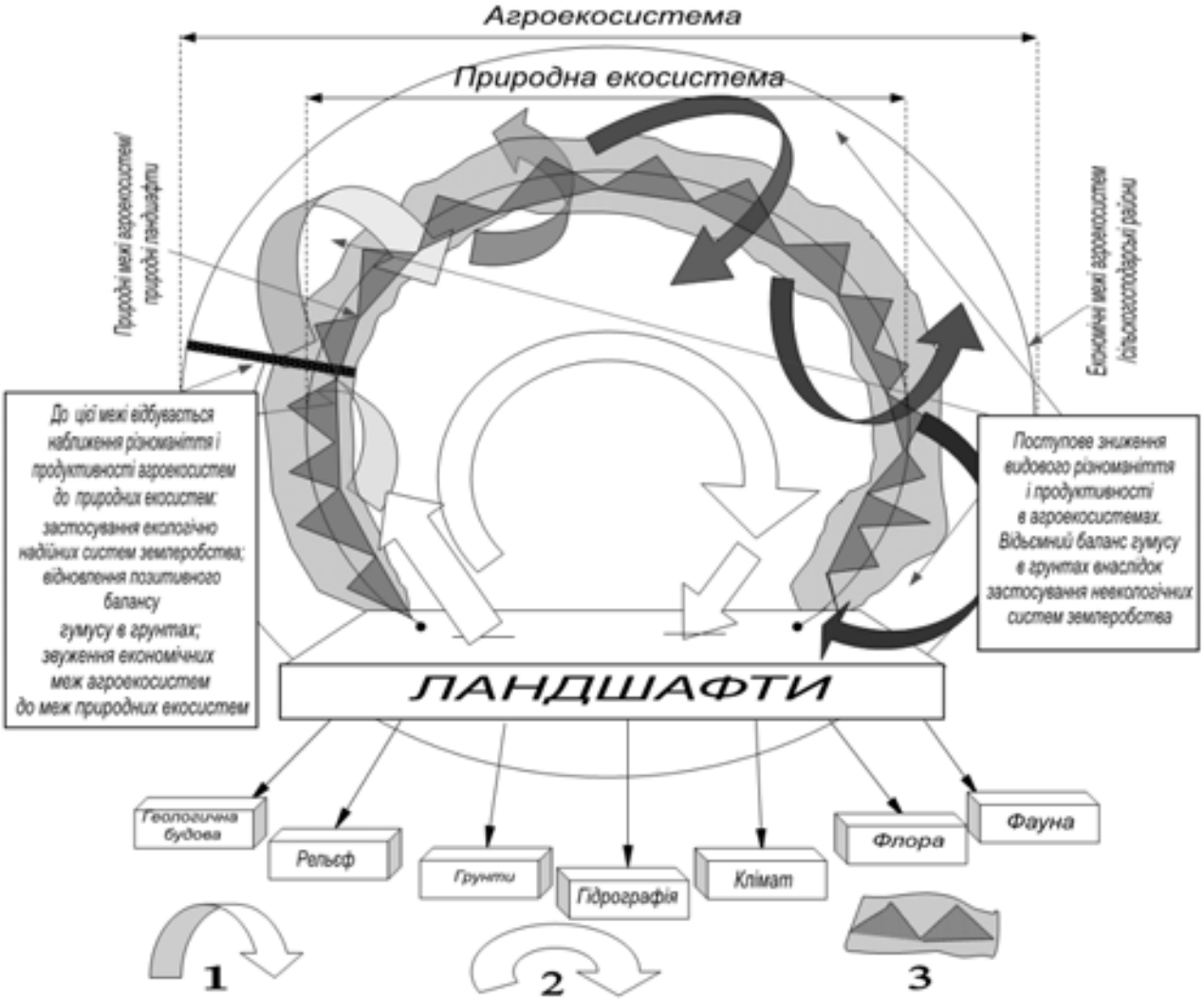


Рис. 1. Динаміка формування агроекосистем. *Умовні позначення*: 1 – потоки речовини і енергії, що формуються в агроекосистемах; 2 – потоки речовини і енергії, що формуються в природних екосистемах; 3 – зона рухомого кордону агроекосистеми /

Fig. 1. Dynamics of agroecosystem formation. *Legend*: 1 – flows of matter and energy formed in agroecosystems; 2 – flows of matter and energy formed in natural ecosystems; 3 – zone of the moving boundary of the agroecosystem

економічні орієнтири (на потребу країнам що розвиваються, в сучасному розумінні «Країни Глобального Півдня») абсолютно знецінили головне гасло концепції, щодо «збереження ресурсів для майбутніх поколінь». Саме тому ні концепція екологічної економіки Германа Дейла, ні останні висновки Римського клубу, ні останні праці вчених з Дельфійського університету не переконують в тому, що з 1992 року стратегія сталого розвитку (яка виросла із концепції) вирішила глобальну екологічну проблему. Більше того, ця проблема весь час загострюється. На підтвердження наших слів нагадаємо що карта «екологічний сліду планети» датована 2010 роком та така ж карта 2025 р. показує що майже вся Африка, Індія, Пакистан, та інші країни Глобального Півдня, яким після Йоханнесбургу, «дали добро» на підвищення рівня життя, стали його підвищувати за рахунок вичерпних природних ресурсів, які згідно концепції сталого розвитку «треба зберегти для наступних поколінь» [33].

На сьогоднішній день «Стратегія сталого розвитку» із ключового обмежувального документу перетворилась в так званий «Маніфест комуністичної партії», який закликає багаті країни поділитись з бідними. А якщо вони не хочуть...? Напевно, внутрішньою, не проговореною вголос причиною російської збройної агресії є намагання цієї псевдоімперіії зібрати з усього світу під свої прапори усіх «бідних і знедолених» під старим гаслом «Пролетарі усіх країн – єднайтеся!».

Протягом усього розвитку людства на Землі її поверхня зазнала величезних просторових трансформацій. Сучасний етап цих трансформацій характеризується складними інформаційними процесами, які, у свою чергу, формують відповідні потоки речовини та енергії. Одночасно, за допомогою системи механізмів реплікації,

відбувається просторовий перерозподіл [34] різноманітних ресурсів на користь розвинених країн через опосередкований вплив на ресурсний потенціал планети (зокрема через механізми Кіотського протоколу, квот, обмежень та ембарго Світової організації торгівлі та інші). Ця тенденція чітко проявляється сьогодні в агресивному ресурсному розширенні двох найбільших (за обсягом ВВП) країн світу – Сполучених Штатів Америки та Китайської Народної Республіки.

Отже, «глобальна екологічна проблема» є результатом просторової асиметрії регіональних кластерів різних просторових типів ноосферних екосистем – агро-, урбо- та інфраекосистем.

Розширення інформаційних технологій зрештою призведе до насичення («стиснення») географічного простору різноманітними наборами інтелектуальних екосистем, що призведе до нових якісних зрушень у просторовому існуванні людства. Ці зрушення, ймовірно, призведуть до двох основних тенденцій зниження рівня стиснення географічного простору. Перша тенденція – експансіоністська – полягає у штучному відтермінуванні критичної межі тиску в часі шляхом розробки моделей оптимізації географічного простору (Тюнен, Вебер, Родоман, Топчієв) (рис. 2) [35].

Друга тенденція – більш інтенсивна, а саме

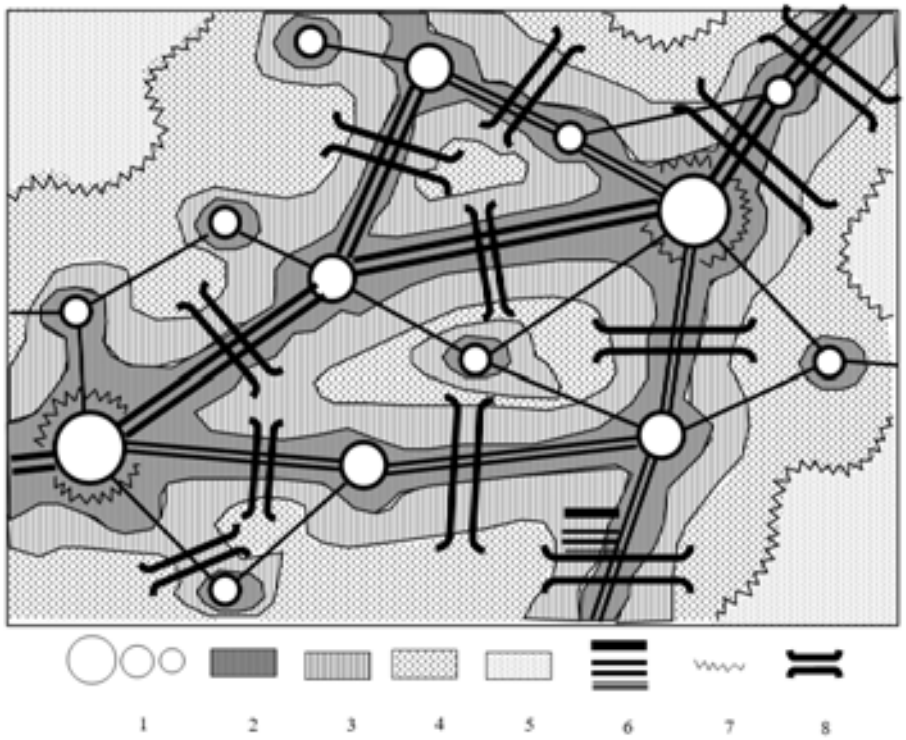


Рис. 2. Теоретична модель (картоїд) раціональної територіальної організації природокористування (системи «природа-суспільство») за О.Г. Топчієвим. *Умовні позначення:* 1 - міста та урбанізовані райони різних соціально-економічних рангів; 2 - селитебні землі міст та урбанізованих ареалів з максимальними антропогенними навантаженнями на територію; 3 - землі інтенсивного господарського використання з високими антропогенно-техногенними навантаженнями; 4 - землі екстенсивного господарського використання з помірними антропогенно-техногенними навантаженнями; 5 - землі, що не використовуються (території, що особливо охороняються); 6 - транспортні магістралі; 7 - біосферні буферні зони; 8 - біосферні коридори /

Fig. 2. Theoretical model (cartoid) of rational territorial organization of nature use (nature-society system) according to O.G. Topchiev. *Legend:* 1 - cities and urbanized areas of various socio-economic ranks; 2 - settlement lands of cities and urbanized areas with maximum anthropogenic loads on the territory; 3 - lands of intensive economic use with high anthropogenic and technogenic loads; 4 - lands of extensive economic use with moderate anthropogenic and technogenic loads; 5 - unused lands (specially protected areas); 6 - transport arteries; 7 - biosphere buffer zones; 8 - biosphere corridors

поступове формування штучно підтримуваних екосистем у космічному просторі. Таким чином, розвиток майбутніх технологій, за першою тенденцією, буде пов'язаний з подальшим розширенням використання природних ресурсів країн, що розвиваються; за другою тенденцією, він буде пов'язаний зі швидким розвитком космічних технологій, про що сьогодні свідчать невпинні зусилля Ілона Маска.

Реалізуючи перший шлях розвитку (більш реалістичний у найближчому майбутньому), доцільно оптимізувати використання географіч-

ного простору відповідно до ротації різних елементів (та їх функцій) у межах регіональної структури [19].

Розглядаючи концепцію «осьового часу» в сучасній історії, доцільно знайти біологічні аналоги цій концепції. На нашу думку, винахід плуга римлянами, його удосконалення К. Саксом та подальша обробка землі шляхом її перевертання становлять «переломний етап» в інтелектуальному розвитку людства. Він започаткував процес навмисного руйнування біосфери.

Це призвело до того, що на початку 21 століття світове сільське господарство перевищувало на 10% викиди CO_2 порівняно із спалюванням всього викопного палива. Однак ця тенденція почала чітко проявлятися з кінця 19 століття через цілеспрямоване виділення орних земель для виробництва кормів у структурі оброблюваних площ [36] (рис. 3).

Таким чином, сільськогосподарські екосистеми, міські екосистеми та інфраекосистеми разом створюють модифіковану ноосферну екосистему виду Homo sapiens. В результаті просторової динаміки, властивої цьому виду, невпинно зростає інформаційний вплив урбоекосистем на зовнішнє середовище, зокрема завдяки інструментарію інформаційної інфраструктури (рис. 4).

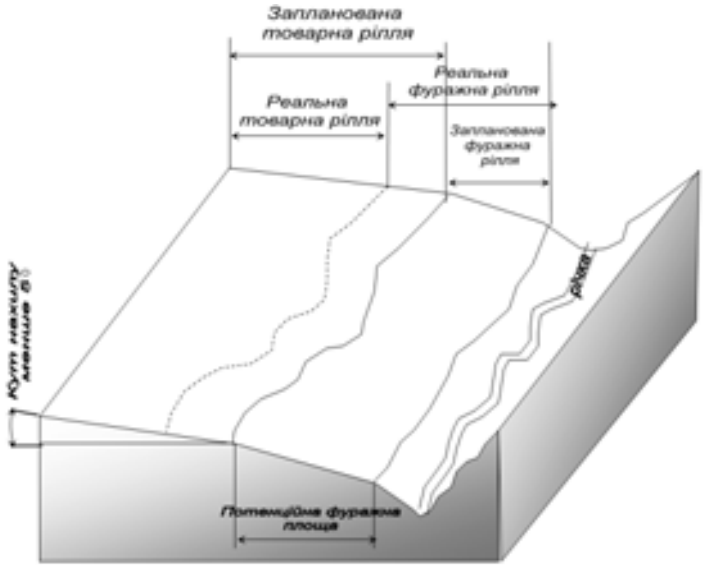


Рис. 3. Виділення товарної і фуражної ріллі залежно від рельєфу /
Fig. 3. Allocation of arable and fodder land depending on the relief

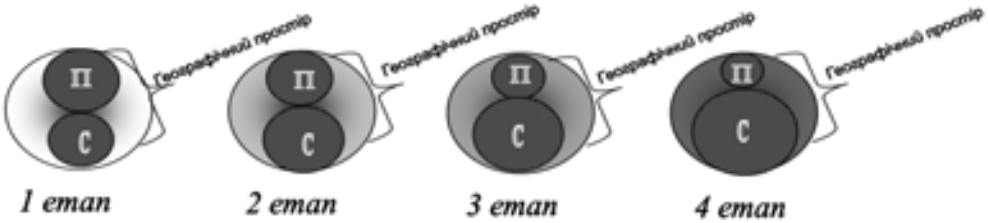


Рис. 4. Головні етапи взаємодії природи і суспільства(просторово-часові зрізи).
Різними тонами сірого кольору показаний різний ступінь «утискання» географічного простору /
Fig. 4. Main stages of interaction between nature and society (spatial-temporal cross-sections).
Different shades of gray indicate different degrees of "compression" of geographical space

Люди разом активно заселяли географічний простір з часів неоліту, поступово «стискаючи» його. Враховуючи, що побудова інтелектуального поля (ноосфери) формується в межах певної системи відліку, правдоподібно зробити висновок, що стиснення географічного простору має компенсуватися реальним часом [36]. У багатьох відношеннях людство «позичило» час у природи, тим самим «обганяючи» її у своєму еволюційному процесі. Етапи, показані на рисунку 4, відповідають ключовим концептуально важливим відтинкам часу у взаємодії між природою та суспільством. Перший етап у часі збігається з «відокремленням» виду Homo sapiens від інших видів на початку еволюції людини. Починаючи з II фази (неоліту), люди почали активну структурну модифікацію поверхні планети.

Третій етап починається з індустріальної цивілізації, де люди використовують різні механічні пристрої для прискорення структурної, фізичної та енергетичної трансформації природних екосистем. Згідно з носферною теорією Вернадського, другий етап являє собою оптимальну взаємодію природи та суспільства. Водночас,

однак, очікується також «розширення» географічного простору в результаті його стиснення «інфраекосистемами». IV етап знаменує собою віху на порозі відходу розумних форм життя з нашої планети або початку формування позаземних екосистем. Відповідно концепції нооекосистем, найголовніша причина загострення екологічної проблеми полягає в різних швидкостях розвитку суспільства і природи. Результат цієї різниці обов'язково «проектується» в географічний простір. Ці «ефекти» або видимі, або приховані з точки зору спостерігача, що пов'язано з двома типами кордонів в агроекосистемах (рис. 1).

Зокрема, доведено, що у разі незбігання природних і економічних меж агроекосистем баланс гумусу у ґрунтах має тенденцію до негативного [19].

У нашому випадку, сільськогосподарські екосистеми, що сформувалися в Харківській області, дійсно мають подвійні межі, а, отже, можуть бути знайдені в географічному просторі. Таким чином, при проектуванні будь-якого двовимірного або навіть тривимірного географічного об'єкта можна очікувати формування якісно нової просторової структури в «четвертому вимірі». На рисунку 5 продемонстрована логіка такого представлення: (А - двовимірний варіант) - штрихування в межах комірки; (Б - тривимірний варіант) - верхній переріз (рис. 5). Це можуть бути межі ландшафтів, екосистем чи територій сільськогосподарської спеціалізації. Ступінь «розбіжності» меж цих комплексів відповідає темпам розвитку природи та суспільства. Отже, для того, щоб забезпечити конструктивне розв'язання «глобальної екологічної проблеми», слід знайти ті сегменти простору, які відображають цю невідповідність у темпах розвитку природи та суспільства, і в майбутньому поступово зменшувати їх, розміщуючи в оптимальних пропорціях. Дослідивши формування агроекосистем на реальній території (Харківська область), були виявлені «запозичені» часові «відрізки», які відобразилися в просторі (рис. 6).

Продовження досліджень щодо зміни просторової диференціації агроекосистем на території Харківщини за 30 років надало можливість підтвердити життєздатність авторської концепції. Простежується зростання монокультурного ведення агровиробництва, що спрощує речовинно-енергетичні відносини в агроландшафтах і, як наслідок відбувається просторове укрупнення сільськогосподарських екосистем та перетин їх природних меж (рис. 7).

Порівнюючи сільськогосподарське районування області в 1985 році (11 сільськогосподарських районів, кордони яких збігаються з економічними кордонами агроекосистем) [37] та у 2015 році бачимо усього 7 районів, що свідчить про збільшення площ ентропійного напруження. Водночас вплив урбоекосистем на своє сільське оточення продовжує поглиблюватись, призводячи до збезлюднення села зі збільшенням ризику загострення екологічних проблем. Вірогідність нашого підходу підтверджується сучасним адміністративно-територіальним поділом Харківської області, де виділяється 7 адміністративних районів – Харківський, Чугуївський, Богодухівський, Ізюмський, Берестинський (колишній Красноградський), Куп'янський, Лозівський. Подібна ситуація спостерігається і в Черкаській області [38].

Виходячи з вищезазначеного, одним із можливих способів гармонізації соціо-природної взаємодії може бути просторове чергування функцій сільськогосподарських та міських екосистем, зберігаючи при цьому сполучні функції інфраекосистем при контактному (а не бар'єрному) типі кордонів. Крім того, території з відносно незміненою природою могли б стати центрами залучення певної кількості міських жителів, де (за Доксіадісом) були б інтегровані рекреаційні та сільськогосподарські функції (рис.8). Розроблена модель заснована на принципі просторової ротації.

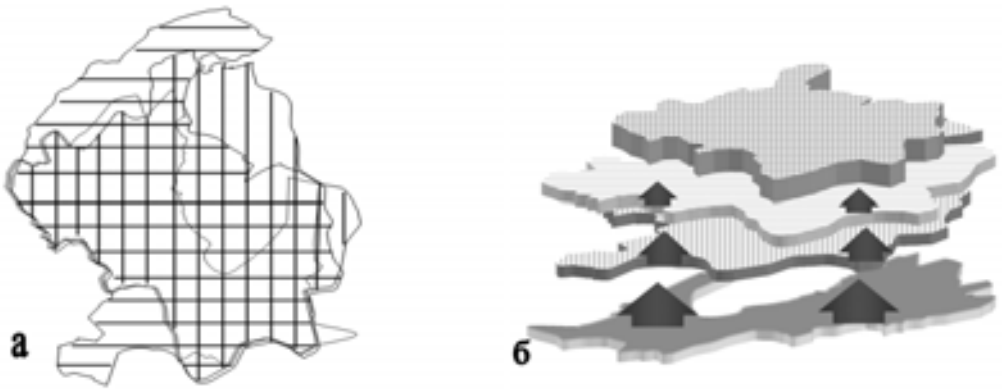


Рис. 5. Утворення якісно нового просторового n-об'єкту шляхом проекції декількох двомірних або тримірних об'єктів а) двомірна проекція; б) загальний вигляд /
Fig. 5. Creation of a qualitatively new spatial n-object by projecting several two-dimensional or three-dimensional objects a) two-dimensional projection; b) general view

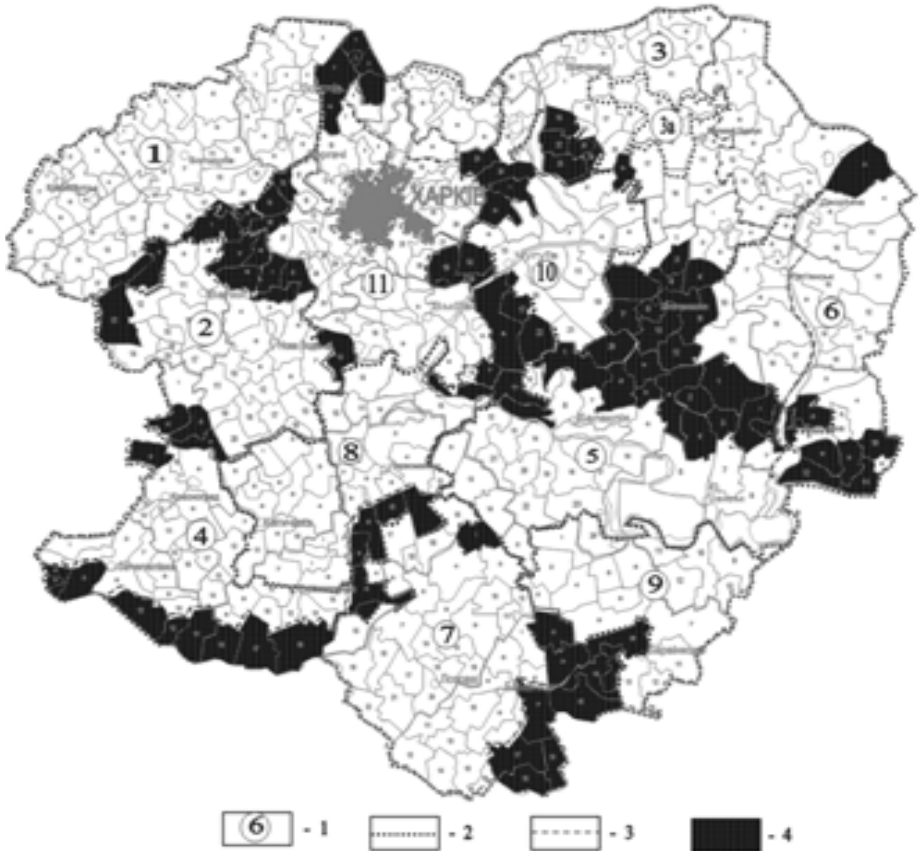


Рис. 6. Формування зон ентропійного напруження.
Умовні позначення: 1. номери сільсько-господарських районів;
2. межі сільськогосподарських районів (економічні межі агроекосистем);
3. межі типів організації території (природні межі агроекосистем);
4. ділянки (сегменти) простору, на які «незбігаються» природні
і економічні межі агроекосистем /
Fig. 6. Formation of zones of entropic tension.
Legend: 1. numbers of agricultural regions; 2. boundaries of agricultural regions (economic boundaries of agroecosystems); 3. boundaries of types of territory organization (natural boundaries of agroecosystems); 4. areas (segments) of space where the natural and economic boundaries of agroecosystems do not coincide



Рис. 7. Межі агроекосистем, що формуються в Харківської області (2015р.)
(I–VII – сільськогосподарські райони) / Fig. 7. Boundaries of agroecosystems formed in the Kharkiv region (2015) (I–VII – agricultural areas)

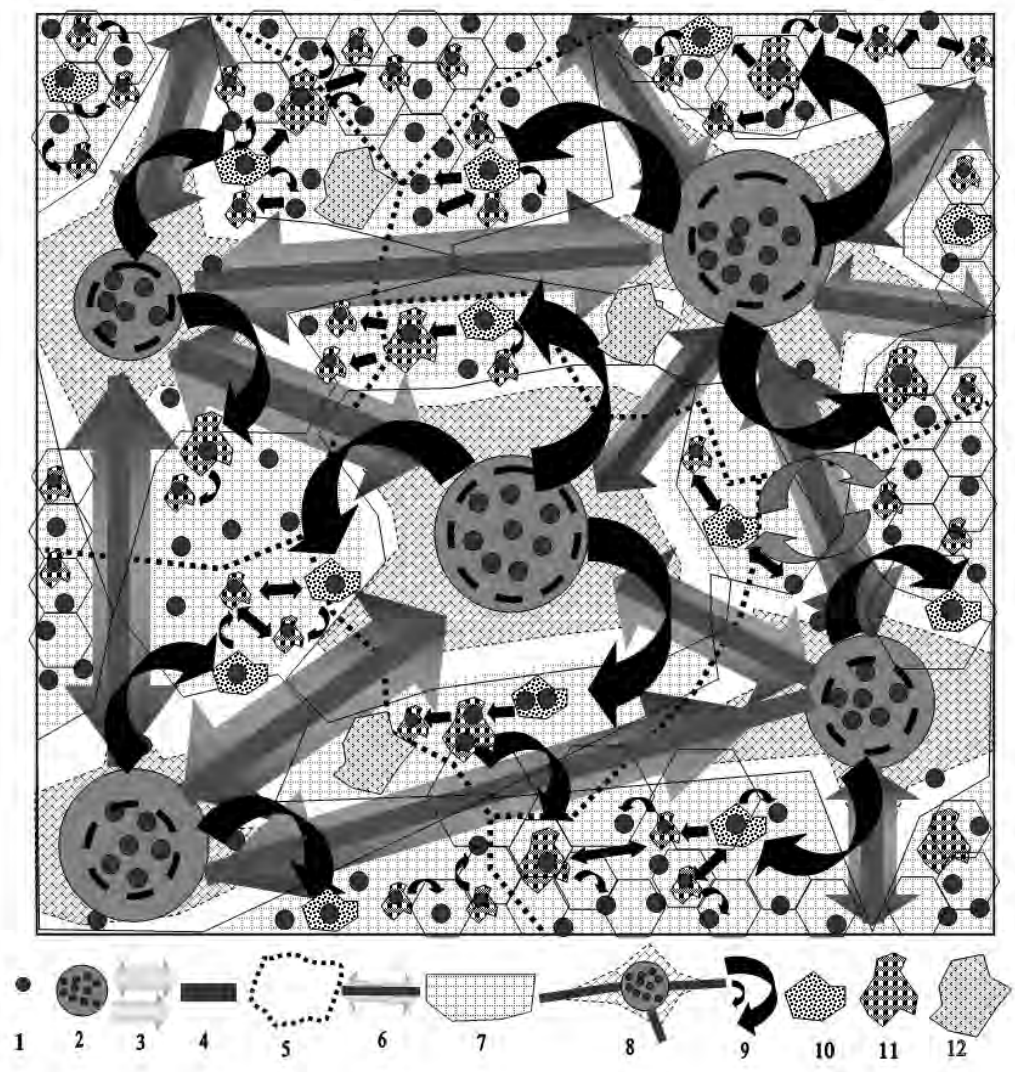


Рис. 8. Ідеальна модель соціоприродної взаємодії в процесі природокористування, заснована на принципі просторової ротації. *Умовні позначення*: 1 – окрема особина виду *homo sapiens*; 2 – міські поселення; 3 – інформаційні канали; 4 – сучасні шляхи сполучення; 5 – поля впливу стаціонарних поселень; 6 – інфраекосистеми; 7 – агроекосистеми; 8 – урбоекосистеми. 9 – напрямки просторової ротації функцій агро- та урбоекосистем. 10 – ерголандшафтні зони, агро-рекреаційні парки, «дендро»- та «акваполіси» як осередки дезурбанізації; 11 – сільські поселення; 12 – об'єкти екомережі /
Fig. 8. An ideal model of socio-natural interaction in the process of nature management, based on the principle of spatial rotation. *Legend*: 1 – individual member of the species Homo sapiens; 2 – urban settlements; 3 – information channels; 4 – modern transport routes; 5 – spheres of influence of stationary settlements; 6 – infraecosystems; 7 – agroecosystems; 8 – urban ecosystems; 9 – directions of spatial rotation of agro- and urban-ecosystem functions; 10 – ergolandscape zones, agro-recreational parks, "dendro" and "aquapoles" as centers of deurbanization; 11 – rural settlements; 12 – eco-network objects

На межі міської екосистеми розвивається складніша просторова динаміка нашого виду, де поступово виникає нова, континуально-дискретна схема розселення. У цьому випадку гексагональна сітка (за Ф. Кристаллером) має шанс стати кінцевим станом усієї системи [38].

Головною особливістю запропонованої моделі, на відміну від попередніх моделей (Hoggett, 1965; Izzard, 1964), є те, що вона загалом відповідає динаміці популяцій, що спостерігається у інших видів у природі, з відносно точним визначенням середовища існування/екологічної ніші окремої особини Homo sapiens, з певним контактним типом кордонів, що сприяло б формуванню перехідних зон, або екотонів. У запропонованій моделі модифікації просторових відносин можуть бути дуже різноманітними; однак основний напрямок взаємодії між природою та суспільством радикально змінюється від антропоцентричної до адаптивної взаємодії.

У нашій моделі пропонується наблизити просторову організацію суспільства до «сталості» шляхом аналізу різних сценаріїв переходу відповідно різним просторовим рівням (Таблиця 1) [19].

Таблиця 1 / Table 1

Сценарії переходу до сталого розвитку (ноосфери) /
Scenarios for transition to sustainable development (noosphere)

Елементи сценаріїв *Scenario elements*	*Сценарії та концепції природокористування* *Scenarios and concepts for natural resource use*			
	Консерваціоністський *Conservationist*	*Центристський* *Centrist*	*Сцієнтистський* *Scientist*	*Ноосферний* *Noospheric*
Межа чисельності народонаселення планети (млрд. осіб) *Limit of the planet's population (billion people)*	0,5–1,5	8–12	30–50	8-10
Характер урбанізації *The nature of urbanization*	Рівень урбанізації зменшується, замість мегаполісів і великих міст розвиваються екомережі	Поступова стабілізація кількості і розміру міст, а також населення Землі	Рівень урбанізації підвищується, екологізуються великі міста, в т.ч. мегаполіси	Рівень урбанізації зменшується, міста залишаються, але перестають грати роль «соціальної істоти», розширюється мережа екопоселень
Зміна розміру світового енергоспоживання *Change in global energy consumption*	Пониження в 6–10 разів	Збільшення в 2–3 рази	Збільшення в 10 і більше разів	Стабілізується на існуючому рівні, але структура енергоспоживання докорінно змінюється у бік енергозбереження
Структура енергетики *Energy structure*	Енергетика на основі ВДЕ (відновлюваних джерел енергії)	Поліенергетика: атомна, на основі ВДЕ, теплова	Переважання атомної енергетики	Базова – гібридна та альтернативна; підтримуюча – атомна.
Характер сільского господарства: *Nature of agriculture:*	Ощадливий	Помірно-ощадливий	Надінтенсивний	Ощадливо-натуральний
- частка ріллі *arable land share*	Низька (35-40%)	Помірна (до 50%)	Висока (понад 60%)	Низька (35-40%)
- система землеробства *farming system*	Органічна. Мінеральні добрива і пестициди не використовуються	Компромісна. Мінеральні добрива і гербіциди використовуються в помірних дозах.	Інтенсивна. Широко використовується закритий грунт, високі дози мінеральних добрив, зрошення, монокультура.	Високоадаптивна до місцевих умов, з мінімальною кількістю енергетичних субсидій
- різноманіття сільскогосподарських тварин і тип годівлі *diversity of farm animals and type of feeding*	Високе різноманіття, екстенсивна годівля за рахунок природних кормових угідь, стимулятори росту не використовуються	Помірне різноманіття, комплексні кормові раціони з участю кормів з ріллі, стимулятори росту не використовуються	Низьке різноманіття, інтенсивна відгодівля великої рогатої худоби, свиней, птиці кормами з ріллі, широке використання стимуляторів росту і іншої «біохімії»	Різноманіття згідно з місцевими традиціями, комплексна годівля, адаптована до місцевих умов (за умови неперевищення частки «фуражної ріллі» більше, ніж на 15%).
- трансгенні сорти і породи *transgenic varieties and breeds*	Не використовуються	Використовуються помірно	Використовуються широко	Трансгенні та інтродуковані рослини або виключені взагалі, або суттєво не впливають на структуру культурних фіто- та зооценозів

Продовження таблиці 1 / Continuation of Table 1

- особливості споживання сільськогосподарської продукціїі *features of agricultural product consumption*	Переважна відмова від тваринних білків на користь рослинних	Раціон харчування наближений до існуючого	Раціон харчування «викривлений» у бік подальшого нарощування споживання тваринного білка	Раціон харчування збалансований і відповідає місцевим традиціям
Основні конструкційні матеріали (та мінеральні ресурси) *Main construction materials (and mineral resources)*	Вторинні	Первинні і вторинні при розвитку ресурсозберегаючих технологій	Заміна вичерпних ресурсів їх новими еквівалентами	Заміна вичерпних ресурсів їх новими еквівалентами, які будуть здатними до біологічного розкладання після завершення використання
Забруднення навколишнього середовища *Environmental pollution*	Мінімальне за рахунок закриття усіх екологічно брудних виробництв і впровадження безвідходних технологій	Залишається на існуючому рівні	Помірне за рахунок маловідходних технологій, удосконалених очисних споруд і захоронення особливо небезпечних відходів	Мінімальне за рахунок дезурбанізації, переходу на нові конструкційні матеріали, зменшення загального рівня споживання і запровадження значної частки (до 40% у ВВП) натурального господарства.
Охорона біорізноманіття *Biodiversity conservation*	Повне збереження	Збереження більшої частини	Збереження 50-70%	Поступова відмова від агроекосистем в їх сучасному вигляді на користь адаптованих форм природокористування
Частка охоронних природних територій на планеті *Proportion of protected natural areas on the planet*	70%	33%	Менше 10%	Потреба у запровадженні природо-охоронних територій поступово зникає

Висновки

Концепція сталого розвитку починаючи з Ріо-1992 зазнала глибоких трансформацій, які докорінно змінили її початковий обмежувальний зміст. І дійсно, дуже важко знайти «гармонію» між усе зростаючою кількістю населення з відповідними потребами і збереженням в недоторканому стані природних екосистем.

Як спосіб досягнення сталості, автори пропонують розглядати розвиток сільськогосподарських екосистем як пріоритетну модель ноосферної екологічної ніші homo sapiens. Це передбачає наближення адміністративно-територіального поділу до меж кордонів агроекосистем. Зауважуючи, ми наголошуємо, що фундаментальною гарантією «ноосферного» управління природою не можуть бути квоти на викиди вуглекислого газу чи інші обмежувальні заходи, а успішна підтримка самовідновлення природних екосистем в окремих країнах, одним з модифікованих різновидів яких є агроекосистеми.

Логіка «вписання» природокористування у ноосферні речовинно-енергетичні механізми повинна відповідати наступним принципам:

1. Первинна просторово-часова одиниця ноосферогенезу – агроекосистема існує починаючи з неоліту та може бути відстежена в часі і в просторі.

2. Зокрема цю динаміку можливо відстежити на середньомасштабному просторовому рівні, починаючи з меж ферми, або ж селянського фермерського господарства.

3. Якщо економічні межі сільськогосподарських екосистем наближаються до своїх природних меж, можна стверджувати про збільшення ефективності вирішення глобальної екологічної проблеми, що відповідає гаслу концепції сталого розвитку: «Мисли глобально, дій локально!»

4. Адміністративно-територіальна структура будь-якої країни повинна бути розроблена відповідно до природних меж агроекосистем, що дозволяє ефективно керувати екологічним та еконо-

мічним природокористуванням.

5. Концепція носферних екосистем є менш екстремальною версією алармістської концепції. Вона може узгодити нині напружені відносини між природою та суспільством.

Список використаних джерел

1. *IISD. (2020). Summary of the UN summit on biodiversity: 30 September. Earth Negotiations Bulletin. 9 (752), 1–9. https://enb.iisd.org/download/pdf/enb09752e.pdf*
2. *Ferreira, N. M., Wendy, E., Kroner, R. C., Kinnaird, M. F., Prist, P. R., Valdujo,P., & Vale, M. M. (2021). Drivers and causes of zoonotic diseases: An overview. Parks, 27(Special Issue), 15-24. doi: https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2020.PARKS-27-SIMNF.en*
3. *Bernstein, S. (2013). Rio + 20: Sustainable development in a time of multilateral decline. Global Environmental Politics. 13 (4): 12–21. doi: https://doi.org/10.1162/GLEP_e_00195*
4. *Clémençon, R. (2012) Welcome to the Anthropocene: Rio + 20 and the meaning of sustainable development. The Journal of Environment & Development,21(3), 311–338. doi: https://doi.org/10.1177/1070496512457289*
5. *Guber, D. L. & Bosso, C. J. (2013). Issue framing, agenda setting, and environmental discourse. In Kraft, M. E. and Kamieniecki, S. (eds.) The Oxford Handbook of U.S. Environmental Policy (pp. 437–460). Oxford University Press.*
6. *Armstrong, J. H., & Kamieniecki, S. (2019). Sustainability policy research: A review and synthesis. Policy Studies Journal, 47(1), 45–65. doi: https://doi.org/10.1111/psj.12320*
7. *Dinerstein, E., Vynne, C., Sala, E., Joshi, A. R., Fernando, S., Lovejoy, T. E., ... Wikramanayake, E. (2019). A Global deal for nature: Guiding principles, milestones, and targets. Science Advances, 5(4), 1–17. doi: https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw2869*
8. *European Union. (2019). Towards a global pact for the environment. Strasbourg, Feb. 6, 2019. Conference 'Global Pact for the Environment' at the European Parliament. Accessed at https://globalpactenvironment.org/en/event/conference-towards-a-global-pact-for-the-environment-at-the-european-parliament/*
9. *Hickel, J. (2019). The contradiction of the sustainable development goals: Growth versus ecology on a finite planet. Sustainable Development, 27, 873–884. doi: https://doi.org/10.1002/sd.1947*
10. *Machin, A. (2019). Changing the story? The discourse of ecological modernisation in the European union. Environmental Politics, 28(2), 208-227*
11. *Bernstein, S. (2013). Rio + 20: Sustainable development in a time of multilateral decline. Global Environmental Politics, 13, 4, Nov. 2019.*
12. *Clémençon R. (2021). Is sustainable development bad for global biodiversity conservation? Global Sustainability. 4:e16. doi: https://doi.org/10.1017/sus.2021.*
13. *Schlosberg, D. (2019). From post-materialism to sustainable materialism: The environmental politics of practice-based movements. Environmental Politics. Published online: 2, 08 Mar. doi: https://doi.org/10.1080/09644016.2019.1587215*
14. *Morse, S. (2011). Sustainability. A biological perspective. Cambridge UniversityPress.*
15. *FAO. (2018). Transforming food and agriculture to achieve the SDGs. Rome: UN Food and Agricultural Organization. http://www.fao.org/3/I9900EN/i9900en.pdf*
16. *Chasek, P. S., Wagner, L., Leon, F., Lebada, A. M., & Risse, N. (2016). Gettingto 2030: Negotiating the post-2015 sustainable development agenda. RECIEL, 25(1), 5–16. doi: https://doi.org/10.1111/reel.12149*
17. *Clémençon, R. (2016b). The two sides of the Paris climate agreement: Dismalfailure or historic breakthrough? Journal of Environment and Development, 25(1), 3–24. doi: https://doi.org/10.1177/1070496516631362*
18. *Nazaruk, M. M., Maksymenko, N. V. (2021). Influence of Geology and Relief on the Society Evolution. Man and Environment. Issues of Neoecology, (35), 8-17. https://doi.org/10.26565/1992-4224-2021-35-01*
19. *Sonko S.P. (2019). Man in Noosphere: Evolution and Further Development. Philosophy and Cosmology, 22. The Academic Journal: 51-75. Kyiv. doi: https://doi.org/10.29202/phil-cosm/22/5.*
20. *UNEP/WCMC. (2021). Megadiverse countries. Access at https://www.biodi-versitya-z.org/content/megadiverse-countries*
21. *Curry, Patrick. Ecological ethics: an introduction (2006). Cambridge, England; Malden, Mass.: Polity Press. 173. https://archive.org/details/ecologicalethics0000curr_z8t7*
22. *Maksymenko N. V., Voronin V. O., Burchenko S. V., Sonko S. P. (2023). Ecosystem Service of Carbon Sequestration in Forest Landscape (On Example of Kharkiv Region, Ukraine). European Association of Geoscientists & Engineers, 17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Nov. 2023, 2023: 1–5. doi: https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520106*
23. *Максименко, Н. В., Воронін, В. О., & Бурченко, С. В. (2023). Геоекологічна оцінка лісових ландшафтів як підґрунтя для визначення екосистемних послуг. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна серія «Екологія», (29), 37-47. doi: https://doi.org/10.26565/1992-4259-2023-29-04*
24. *Dinerstein, E., Vynne, C., Sala, E., Joshi, A. R., Fernando, S., Lovejoy, T. E., ...Wikramanayake, E. (2019). A Global deal for nature: Guiding principles, milestones, and targets. Science Advances, 5(4), 1–17. doi: https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw2869*
25. *Leach, M., Reyers, B., Bai, X., Brondizio, E. S., Cook, C., Díaz, S., Espindola, G., ... Subramanian, S. M. (2018). Equity and sustainability in theAnthropocene: A social–ecological systems perspective on their intertwinedfutures. Global Sustainability, 1, e13, 1–13. doi: https://doi.org/10.1017/sus.2018.12*

26. Созінов О.О., Сонько С.П. (2006). Агроекосистема. Екологічна енциклопедія: У 3т. Редколегія: А.В. Толстоухов (головний редактор) та ін. К.: ТОВ «Центр екологічної освіти та інформації», Т. 1: 14.
27. Тойнбі, Арнольд (1995). Дослідження історії. Том 2. Пер. з англ. В. Митрофанова, П. Таращука. К.: Основи, 406.
28. Голубець М. А. (2000). Екосистемологія. Львів: Поллі, 178.
29. Deleuze, Gilles and Félix Guattari. (2004) A Thousand Plateaus. Trans. Brian Massumi. London and New York: Continuum, 2: 629.https://files.libcom.org/files/A%20Thousand%20Plateaus.pdf
30. Лазарева М. (2021). Гіпотеза Геї в контексті глобальних викликів сучасності (оглядова стаття). Гуманітарні науки, 7, 1: 39-45.
31. Gorshkov V., Makarieva A. (2018). Time in life, technology and physics. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35964.59528
32. Jaspers, Karl; Bullock, Michael (Tr.) (1953). The Origin and Goal of History (1st English ed.). London: Routledge and Keegan Paul. LCCN 53001441. Originally published as Jaspers, Karl (1949). Vom Ursprung und Ziel der Geschichte (1st ed.). München: Piper Verlag. LCCN 49057321.
33. 17 Цілей сталого розвитку. https://globalcompact.org.ua/tsili-stijkogo-rozvytku/
34. Sonko S.P. The concept of spatial redistribution in modern subject field of social geography/ Часопис соціально-економічної географії: міжрегіон. зб. наук. праць. – Харків, ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2016. Вип. 21 (2). – С. 12-18. doi: https://doi.org/10.26565/2076-1333-2016-21-01
35. Топчієв О. Г., Мальчикова Д. С., Пилипенко І. О., Яворська В. В. (2020). Методологічні засади географії. Херсон: Видав. дім «Гельветика», 366.
36. Сонько С. П., Максименко Н. В. (2013). Просторові і часові механізми антропогенної експансії агроландшафту. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія: Екологія. 1054. 8: 13–22. URL: http://visnecology.univer.kharkov.ua/sites/default/files/ Papers/2-9.pdf
37. Сонько С.П. (2018). Сільськогосподарське районування Харківської області: географічна проблема – екологічні наслідки. Журнал з геології, географії та екології, 26(1), 165-175. doi: https://doi.org/10.15421/111818
38. Сонько С. П., Зозуля І.О. (2024). Екологічно збалансовані агроекосистеми – запорука сталого розвитку. Людина та довкілля. Проблеми неоекології, 41: 57-69. doi: https://doi.org/10.26565/1992-4224-2024-41-04
39. Сонько С.П. (2004). В пошуках нових моделей центральних місць Вальтера Кристаллера. Геоінформатика. Науковий журнал, 3: 84-91.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу
Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Noospheric vision of the concept of sustainable development

Segiy Sonko [1]
DSc (Geography), Professor, Department of Ecology and Life Safety,
[1] Uman National University, Uman, Ukraine;
Nadiya Maksymenko [2]
DSc (Geography), Professor, Head of the Department
of Environmental Monitoring and Protected Areas Management,
[2] V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

ABSTRACT

Introduction. The absence of a paradigm for socio-natural development at the noospheric level is now confirmed by the almost complete failure of the concept of sustainable development (especially after Rio+20). Instead of its original restrictive content, the current "strategy" for sustainable development with 17 goals contains only three that are truly close to the high ideals of Rio-92. The rest of the goals emphasize the intensification of economic development at the expense of the planet's natural resources. The authors are deeply convinced that the biosphere's direct response to the expansion of our species is numerous cataclysms, pandemics, and wars.

The purpose of this study is to identify socio-natural systems in space and time, which will help determine where humans are now and how far they have "broken away" from the biosphere on the complex and long path to the noosphere/sustainable development.

Research methods. The study is based on an analysis of fundamental natural science works, huge amounts of data on the spatial organization of agriculture in the Kharkiv and Cherkasy regions, and the results of previous studies. In addition to traditional methods of geographical and ecological research, cartographic methods were widely used, in particular the author's methodology of elementary GIS (EGIS), historical-geographical and historiosophical research, modeling, and the development of possible scenarios for the development of socio-natural interaction.

Main findings. The interpretation of the mechanisms of aggravation of the global environmental problem within the evolutionary process is considered in terms of the categories and concepts of the natural history paradigm. It is stated that the global environmental problem is the result of spatial inconsistency of territorial combinations of different types of ecosystems – agroecosystems, urban ecosystems, and infrastructure ecosystems. The main reason for the ineffectiveness of the concept of sustainable development is the incorrect positioning of the species "Homo" in the planet's biosphere. It has been substantiated that the "ecotope" of Homo sapiens goes far beyond the organismic level of species organization and encompasses the ecosystem level, forming an agroecosystem as an ecological niche with moving spatial boundaries. Based on an analysis of the evolution of agroecosystems in the Kharkiv region over a 3-year period, it has been established that the cause of the aggravation of the global environmental problem is the spatial inconsistency of territorial combinations of noospheric ecosystems. A possible way to harmonize the development of nature and society could be the spatial rotation of the functions of agro- and urban ecosystems while preserving the connecting functions of infraecosystems and striving for contact-type boundaries.

Scientific novelty and practical value. The proposed ideal model of socio-natural interaction in the process of nature use, based on the principle of spatial rotation, radically changes the main direction of interaction between nature and society from anthropocentric to adaptive. At the same time, one of the main conditions for noospheric (sustainable) development is fulfilled—a change in the structure and functions of natural ecosystems by humans that leaves them capable of self-reproduction.

***Keywords**: agroecosystem, urban ecosystem, infraecosystem, biosphere, sustainable development, noosphere, nature management, ecological niche, anthropogenesis.*

References

1. *IISD. (2020). Summary of the UN summit on biodiversity: 30 September. Earth Negotiations Bulletin. 9 (752), 1–9. https://enb.iisd.org/download/pdf/enb09752e.pdf*
2. *Ferreira, N. M., Wendy, E., Kroner, R. C., Kinnaird, M. F., Prist, P. R., Valdujo,P., & Vale, M. M. (2021). Drivers and causes of zoonotic diseases: An overview. Parks, 27(Special Issue), 15-24. doi: https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2020.PARKS-27-SIMNF.en*
3. *Bernstein, S. (2013). Rio + 20: Sustainable development in a time of multilateral decline. Global Environmental Politics. 13 (4): 12–21. doi: https://doi.org/10.1162/GLEP_e_00195*
4. *Clémençon, R. (2012) Welcome to the Anthropocene: Rio + 20 and the meaning of sustainable development. The Journal of Environment & Development,21(3), 311–338. doi: https://doi.org/10.1177/1070496512457289*
5. *Guber, D. L. & Bosso, C. J. (2013). Issue framing, agenda setting, and environmental discourse. In Kraft, M. E. and Kamieniecki, S. (eds.) The Oxford Handbook of U.S. Environmental Policy (pp. 437–460). Oxford University Press.*
6. *Armstrong, J. H., & Kamieniecki, S. (2019). Sustainability policy research: A review and synthesis. Policy Studies Journal, 47(1), 45–65. doi: https://doi.org/10.1111/psj.12320*
7. *Dinerstein, E., Vynne, C., Sala, E., Joshi, A. R., Fernando, S., Lovejoy, T. E., ... Wikramanayake, E. (2019). A Global deal for nature: Guiding principles, milestones, and targets. Science Advances, 5(4), 1–17. doi: https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw2869*
8. *European Union. (2019). Towards a global pact for the environment. Strasbourg, Feb. 6, 2019. Conference 'Global Pact for the Environment' at the European Parliament. Accessed at https://globalpactenvironment.org/en/event/conference-towards-a-global-pact-for-the-environment-at-the-european-parliament/*
9. *Hickel, J. (2019). The contradiction of the sustainable development goals: Growth versus ecology on a finite planet. Sustainable Development, 27, 873–884. doi: https://doi.org/10.1002/sd.1947*
10. *Machin, A. (2019). Changing the story? The discourse of ecological modernisation in the European union. Environmental Politics, 28(2), 208-227*
11. *Bernstein, S. (2013). Rio + 20: Sustainable development in a time of multilateral decline. Global Environmental Politics, 13, 4, Nov. 2019.*
12. *Clémençon R. (2021). Is sustainable development bad for global biodiversity conservation? Global Sustainability. 4:e16. doi: https://doi.org/10.1017/sus.2021.*
13. *Schlosberg, D. (2019). From post-materialism to sustainable materialism: The environmental politics of practice-based movements. Environmental Politics. Published online: 2, 08 Mar. doi: https://doi.org/10.1080/09644016.2019.1587215*
14. *Morse, S. (2011). Sustainability. A biological perspective. Cambridge UniversityPress.*
15. *FAO. (2018). Transforming food and agriculture to achieve the SDGs. Rome: UN Food and Agricultural Organization. http://www.fao.org/3/I9900EN/i9900en.pdf*
16. *Chasek, P. S., Wagner, L., Leon, F., Lebada, A. M., & Risse, N. (2016). Gettingto 2030: Negotiating the post-2015 sustainable development agenda. RECIEL, 25(1), 5–16. doi: https://doi.org/10.1111/reel.12149*
17. *Clémençon, R. (2016b). The two sides of the Paris climate agreement: Dismalfailure or historic breakthrough? Journal of Environment and Development, 25(1), 3–24. doi: https://doi.org/10.1177/1070496516631362*
18. *Nazaruk, M. M., Maksymenko, N. V. (2021). Influence of Geology and Relief on the Society Evolution. Man and Environment. Issues of Neoecology, (35), 8-17. https://doi.org/10.26565/1992-4224-2021-35-01*
19. *Sonko S.P. (2019). Man in Noosphere: Evolution and Further Development. Philosophy and Cosmology, 22. The Academic Journal: 51-75. Kyiv. doi: https://doi.org/10.29202/phil-cosm/22/5.*
20. *UNEP/WCMC. (2021). Megadiverse countries. Access at https://www.biodi-versitya-z.org/content/megadiverse-countries*

21. Curry, Patrick. Ecological ethics: an introduction (2006). Cambridge, England; Malden, Mass.: Polity Press. 173. https://archive.org/details/ecologicalethics0000curr_z8t7
22. Maksymenko N. V., Voronin V. O., Burchenko S. V., Sonko S. P. (2023). Ecosystem Service of Carbon Sequestration in Forest Landscape (On Example of Kharkiv Region, Ukraine). European Association of Geoscientists & Engineers, 17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Nov. 2023, 2023: 1–5 doi: https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520106
23. Maksymenko, N. V., Voronin, V. O., & Burchenko, S. V. (2023). Geoecological assessment of forest landscapes as a basis for the evaluation of ecosystem services. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology, (29), 37-47. doi: https://doi.org/10.26565/1992-4259-2023-29-04 [in Ukrainian]
24. Dinerstein, E., Vynne, C., Sala, E., Joshi, A. R., Fernando, S., Lovejoy, T. E., ...Wikramanayake, E. (2019). A Global deal for nature: Guiding principles, milestones, and targets. Science Advances, 5(4), 1–17. doi: https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw2869
25. Leach, M., Reyers, B., Bai, X., Brondizio, E. S., Cook, C., Díaz, S., Espindola, G., ... Subramanian, S. M. (2018). Equity and sustainability in theAnthropocene: A social–ecological systems perspective on their intertwinedfutures. Global Sustainability, 1, e13, 1–13. doi: https://doi.org/10.1017/sus.2018.12
26. Sozinov O.O., Sonko S.P. (2006). Agroecosystem. Ecological Encyclopedia: In 3 volumes. Editorial board: A.V. Tolstokhov (editor-in-chief) et al. Kyiv: Center for Ecological Education and Information LLC, 1: 14. [in Ukrainian]
27. Toynbee, Arnol (1995). A Study of History, 2. Translated from English by V. Mitrofanov, P. Tarashchuk. Kyiv: Osnovy: 406. [in Ukrainian]
28. Golubets, M. A. (2000). Ecosystemology. Lviv: Polli, 178. [in Ukrainian]
29. Deleuze, Gilles and Félix Guattari. (2004) A Thousand Plateaus. Trans. Brian Massumi. London and New York: Continuum, 2: 629.https://files.libcom.org/files/A%20Thousand%20Plateaus.pdf
30. Lazareva, M. (2021). Gaia's hypothesis in the context of global challenges of our time (review article). Humanities, 7, 1: 39-45. [in Ukrainian]
31. Gorshkov V., Makarieva A. (2018). Time in life, technology and physics. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35964.59528
32. Jaspers, Karl; Bullock, Michael (Tr.) (1953). The Origin and Goal of History (1st English ed.). London: Routledge and Keegan Paul. LCCN 53001441. Originally published as Jaspers, Karl (1949). Vom Ursprung und Ziel der Geschichte (1st ed.). München: Piper Verlag. LCCN 49057321.
33. 17 Sustainable Development Goals. https://globalcompact.org.ua/tsili-stijkogo-rozvytku/ [in Ukrainian]
34. Sonko S.P. (2016). The concept of spatial redistribution in modern subject field of social geography/ Journal of Socio-Economic Geography: Interregional Collection of Scientific Papers. Kharkiv, V.N. Karazin Kharkiv National University, 21 (2): 12-18. doi: https://doi.org/10.26565/2076-1333-2016-21-01
35. Topchiev, O. G., Malchikova, D. S., Pylypenko, I. O., Yavorska, V. V. (2020). Methodological Foundations of Geography. Kherson: Helvetica Publishing House, 366. [in Ukrainian]
36. Sonko, S. P., & Maksymenko, N. V. (2014). Spatial And Temporal Mechanisms of Agricultural Landscapes' Anthropogenic Expansion. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology, (1054), 13-22. Retrieved from https://periodicals.karazin.ua/ecology/article/view/799 [in Ukrainian]
37. Son'ko, S. P. (2018). Agricultural Districts of the Kharkiv Region: Geographical Issues - Environmental Consequences. Journal of Geology, Geography and Geoecology, 26(1), 165-175. https://doi.org/10.15421/111818 [in Ukrainian]
38. Sonko, S. P., & Zozulia, I. O. (2024). Environmentally balanced agroecosystems – key to sustainable development. Man and Environment. Issues of Neoecology, (41), 57-69. https://doi.org/10.26565/1992-4224-2024-41-04 [in Ukrainian]
39. Sonko S.P. (2004). In search of new models of central places by Walter Christaller. Geoinformatics. Scientific journal, 3: 84-91. [in Ukrainian]

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 1 September 2025
Accepted 9 October2025

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-46
UDC 556.166
Received 11 June 2025
Accepted 20 October 2025

Estimation of the extent of marine pollution as a consequence of the Kakhovka reservoir dam destruction based on simulation results

Yurii Tuchkovenko [1]
DSc (Geography), Professor, Leading Researcher,
[1] Institute of Marine Biology of the National Academy of Sciences of Ukraine, Odesa, Ukraine,
e-mail: tuch2001@ukr.net, https://orcid.org/0000-0003-3275-9065;
Dmytro Kushnir [2]
PhD (Geography), Research Associate, Department of Military Training,
[2] Odesa I. I. Mechnikov National University, Odesa, Ukraine,
e-mail: dkush@ukr.net, https://orcid.org/0000-0003-4556-0143

ABSTRACT

Problems Statement and Purpose. In June 2023, as a result of the Kakhovka reservoir dam destruction, pollutants from the Dnipro River entered the Black Sea. This paper discusses the problem of determining the possible accumulation zones of these pollutants in the bottom sediments of the north-western Black Sea water area. The urgency of the problem is determined by the fact that these accumulation zones are potential long-term sources of secondary pollution of the marine environment. Preliminary identification of these zones is necessary for assessing damage done to the natural resources of the sea, as well as for the preparation of marine environment monitoring after the end of military operations. Numerical modelling is used to determine zones of marine pollution, since contact studies in the open sea and in the coastal areas are currently impossible. The hypothesis is accepted that the zones of pollutant accumulation in bottom sediments correspond to those sea areas where the concentration of conservative spill of neutral buoyancy was high in the bottom water layer.

Data and Methods. The numerical hydro- and thermodynamic model Delft3D Flow Flexible Mesh (D-Flow FM), developed by an independent institute for applied research Deltares (Delft, the Netherlands), was used to solve the above problem. The distribution of conservative spill of neutral buoyancy and mineral suspended matter coming with polluted transitional waters from the Dnipro-Bug estuary during June 2023 was modelled. Near the mouth of the Dnipro River an open lateral boundary was set in the model. Based on the data from the hydro-meteorological station "Port Kherson", boundary conditions in the form of water level time-series were imposed. During the simulation, the concentration of the conservative spill of neutral buoyancy was assumed to be equal to 1 conditional unit at the open boundary. The mineral suspended matter concentration was set equal to 100 conventional units. The gravitational settling velocity of suspended particles was assumed to be 5×10^{-5} m s^{-1}. The variability of meteorological parameters (zonal and meridional components of wind speed, atmospheric pressure reduced to mean sea level, air temperature, relative air humidity, percentage of total cloudiness) was set at the upper boundary of the computational domain based on data from the forecast archive of the global weather model GFS (Global Forecast System).

Results and Discussion. The simulation results allowed us to estimate the spatial extent and relative level of pollution of the sea water in the north-western Black Sea area both in the surface and near the seabed. This estimation would not be possible using remote sensing methods only. Areas with possible significant level of sediment contamination and potential sources of secondary marine pollution (due to resuspension) were highlighted. It is recommended to conduct a verificatory monitoring of water and sediment contamination levels for these areas after the end of military operations.

Keywords: *dam destruction, the Kakhovka reservoir, the Dnipro River, the Dnipro-Bug estuary, the Black Sea, north-western part, pollution, primary and secondary, modelling.*

In cites: Tuchkovenko Yurii, Kushnir Dmytro (2025). Estimation of the extent of marine pollution as a consequence of the Kakhovka reservoir dam destruction based on simulation results. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 619-632. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-46

Introduction

After the destruction of the Kakhovka reservoir dam on June 6, 2023, river water from the Dnipro River was flowing into the Black Sea for two weeks. The volume of river water that entered the sea as a result of this catastrophic event amounted to 16.4 km^3 [19], which corresponds to approximately 40% of the annual flow of the Dnipro River.

According to the observation data collected on hydrological post "Kherson", the water level in the lower reaches of the Dnipro River in the morning of June 8 had increased by 5.37 meters compared to the water level of June 5. As a consequence, more than 600 km^2 of land was flooded between June 6 and 9.

After dam destruction, the flood flow intensity was 24,500-29,000 m^3 s^{-1} [19]. Together with the flood flow, the sea received a large amount of different types of pollutants contained in the water and in sediments of the Kakhovka reservoir and which were washed away from the flooded areas of the Lower Dnipro.

Various aspects of the impact of artificial flooding resulted from the Kakhovka reservoir dam destruction on water quality of the north-western Black Sea were discussed in [1, 6, 8, 10, 19, 23].

Impact on biotic components of the marine ecosystems caused by the influx of large volumes of polluted and desalinated transitional waters from the

© Tuchkovenko Yurii, Kushnir Dmytro, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Dnipro-Bug estuary in June 2023 was discussed in [4, 14, 15].

Although two years have passed since the Kakhovka reservoir dam destruction in early June 2023, the consequences for the ecosystem of the north-western Black Sea (NWBS) shelf zone have not been fully explained yet. While an access to the shoreline during 2022-2024 was very limited, conducting field research outside the coastal zone was not possible at all due to outbreak of hostilities.

Therefore, only remote sensing data and results of numerical modelling can be used to form a single holistic picture of the Dnipro River polluted transitional waters spread across the sea and their impact on the water quality of open sea areas. Observation data collected in coastal areas is used to verify and understand this information.

The above-mentioned studies used observation data collected in shallow coastal areas, as well as satellite-derived data on the spatial and temporal variability of sea colour, chlorophyll *a* concentration, and total suspended solids concentration in the surface layer of the sea. The results of numerical modelling of pollutant spread in the north-western part of the Black Sea, shown in papers [8, 10], also refer to the surface layer of the sea. At the same time, the spread of pollutants in the deeper area of the north-western Black Sea will obviously have its own characteristics, different from those in the sea surface layer [7]. This article is devoted to this previously unconsidered part of the problem.

It was noticed in [1, 8, 10] that pollutants delivered with the extreme flood flow of the Dnipro River in June 2023 were partially accumulated in bottom sediments as a result of sorption, hydrolysis and gravitational settling processes, which caused transfer of pollutants from the water column to the bottom sediments.

It was found that the disappearance of a water reservoir will increase the intensity of natural floods in the Lower Dnipro areas [19]. During this period of year, the amount of pollutants in bottom sediments can be increased as a result of small particles of previously polluted sediments being washed away from the drained areas of the Kakhovka reservoir bottom.

As a result of resuspension processes, toxic contaminants accumulated in bottom sediments can re-infiltrate to water column during storms and, therefore, cause secondary pollution of sea water.

In the warm season, areas of accumulation of allochthonous detrital matter could contribute to algal bloom occurrences and to hypoxia and anoxia processes in the bottom layer.

The urgent problem is the determination of areas where the abovementioned processes can strongly happen and affect the quality of marine waters substantially. The only feasible solution to this problem for the time being lies in numerical modelling of the pollutant spread in the sea due to the extreme flood runoff of the Dnipro River. This will enable us to plan the perspective verificatory monitoring of marine environment aimed at assessing the damage done to marine natural resources and identifying measures for their restoration.

The purpose of the work is to estimate the spatial scale and pollution level of north-western part of the Black Sea (including the near-bottom layer) as well as to identify potential areas of secondary contamination of sea water due to Kakhovka reservoir dam destruction based on simulation results.

We hypothesize that zones of pollutant accumulation in bottom sediments correspond to those marine areas where concentration of pollutants in near-bottom layers of water was high after the Kakhovka Reservoir dam destruction.

Material and methods. Numerical modelling of sea water dynamics, spatio-temporal variability of water thermohaline structure and transport of tracers with different properties was used for this study.

A widely acclaimed hydrodynamic model Delft3D-Flow Flexible Mesh (D-Flow FM) developed by Deltares (Delft, the Netherlands) was applied [11]. The D-Flow FM model simulates one-dimensional (1D), two-dimensional (2DH, depth-averaged) or three-dimensional (3D) unsteady flow and transport phenomena resulting from tidal and meteorological forcing, including the effect of density differences due to a non-uniform temperature and salinity distribution (density-driven flow). A combination of 1D, 2D and 3D modelling (1D2D3D) can be applied [13]. D-Flow FM is flexible by using an unstructured grid in the horizontal plane. In the vertical direction D-Flow FM offers two different vertical grid systems: a so-called σ coordinate system (σ-model) introduced by [18] for ocean models and the Cartesian z-coordinate system (Z-model).

The model system of equations consists of the horizontal equations of motion, the continuity equation, the equation of state and the transport equation for conservative constituents. The flow is forced by currents and discharges at the open boundaries, wind stress at the free surface, pressure gradients due to free surface gradients (barotropic) or density gradients (baroclinic). Source and sinks or laterals are included in the equations to model the discharge and withdrawal of water and of constituents and substances [13]. A k-ε turbulence closure model to account for the vertical turbulent viscosity and diffusivity was used for 3D hydro- and thermodynamic modelling.

D-Flow FM solves the Navier Stokes equations for an incompressible fluid, under the shallow water

and the Boussinesq assumptions. In the vertical momentum equation, the vertical accelerations are neglected, which leads to the hydrostatic pressure equation. The set of partial differential equations in combination with an appropriate set of initial and boundary conditions is solved on an unstructured finite volume grid.

The momentum equations in *x*- and *y*-direction are given by:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z} - fv = -\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial P}{\partial x} + F_x + \frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_V \frac{\partial u}{\partial z}\right) + M_x, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z} + fu = -\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial P}{\partial y} + F_y + \frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_V \frac{\partial u}{\partial z} v\right) + M_y, \quad (2)$$

where *u*, *v*, and *w* are the fluid velocities in the *x*-, *y*-, and *z*-directions, respectively; *t* is the time; *f* is the Coriolis parameter, which depends on the geographic latitude ϕ and the angular speed of rotation of the earth Ω ($f = 2\Omega \sin\phi$); ρ_0 is the initial density of the water; $\partial P/\partial x$ and $\partial P/\partial y$ are the baroclinic pressure terms, which represent the pressure gradients; forces F_x and F_y represent the unbalance of horizontal Reynolds stresses; ν_V is the vertical eddy viscosity coefficient; M_x and M_y represent the contributions due to external sources or sinks of momentum (external forces by discharge or withdrawal of water, wave stresses, etc.).

The vertical velocity *w* in the adapting σ coordinate system is computed from the continuity equation:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = h(q_{in} - q_{out}), \quad (3)$$

where q_{in} and q_{out} are the local sources and sinks of water per unit of volume (1 s^{-1}), respectively, and *h* is the total water depth ($h = d + \zeta$; with *d* the depth below some horizontal plane of reference (datum), positive upward; ζ the water level above some horizontal plane of reference (datum).

Under the shallow water assumption, the vertical momentum equation is reduced to a hydrostatic pressure equation. Vertical accelerations due to buoyancy effects and due to sudden variations in the bed topography are not taken into account.

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g h, \quad (4)$$

where *P* is the hydrostatic pressure; ρ is the water density; $g \approx 9{,}81$ m s^{-2} is the acceleration due to gravity.

In case of a non-uniform density, the modelled water density is related to the values of water temperature and salinity by the equation of state.

The forces F_x and F_y in the horizontal momentum equations represent the unbalance of horizontal Reynolds stresses which are modelled using the eddy viscosity concept:

$$F_u = \nu_H\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right), \quad (5)$$

$$F_v = \nu_H\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right), \quad (6)$$

with ν_H the horizontal eddy viscosity coefficient.

The horizontal eddy viscosity coefficient is defined by:

$$\nu_H = \nu_{SGS} + \nu_V + \nu_H^{back}, \quad (7)$$

where ν_{SGS} is the sub-grid scale (SGS) horizontal eddy viscosity, that are not resolved by the horizontal grid ("sub-grid scale turbulence") and which is computed by a dedicated SGS-turbulence model; ν_H^{back} is the background horizontal viscosity, user-defined through the input file.

The vertical eddy viscosity coefficient is defined by:

$$\nu_V = \nu_{mol} + max\left(\nu_{3D},\ \nu_V^{back}\right), \quad (8)$$

where ν_{mol} is the kinematic viscosity of water; ν_{3D} is the 3D part computed by a 3D-turbulence closure model (*k*-ε turbulence model); ν_V^{back} is the background or "ambient" vertical turbulent mixing coefficient.

D-Flow FM solves the depth-averaged continuity equation, derived by integration the continuity equation for incompressible fluids over the total depth, taken into account the kinematic boundary conditions at water surface and bed level, and is given by:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Uh}{\partial x} + \frac{\partial Vh}{\partial y} = Q, \quad (9)$$

with *U* and *V* the depth averaged velocities. *Q* is representing the contributions per unit area due to the discharge or withdrawal of water, precipitation and evaporation:

$$Q = \int_0^h (q_{in} - q_{out})\ dz + R - E, \quad (10)$$

with *R* the non-local source term of precipitation and *E* non-local sink term due to evaporation.

The transport equation here is formulated in a conservative form in Cartesian co-ordinates in horizontal and vertical directions:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial x} + \frac{\partial vc}{\partial y} + \frac{\partial wc}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D_h \frac{\partial c}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_h \frac{\partial c}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(D_v \frac{\partial c}{\partial z}\right) + s, \quad (11)$$

with *c* the mass concentration of the transported substance; D_h the horizontal diffusion coefficient; D_v the vertical diffusion coefficient and *s* the source

and sink term per unit area due to the discharge (q_{in}) or withdrawal (q_{out}) of water and the exchange of heat through the free surface Q_{tot}:

$$s = h(q_{in}c_{in} - q_{out}c_{out}) + Q_{tot}. \quad (12)$$

The total horizontal diffusion coefficient D_h is defined by:

$$D_h = D_{SGS} + D_V + D_h^{back}, \quad (13)$$

with D_{SGS} the diffusion due to the sub-grid scale turbulence model, D_h^{back} the user defined background horizontal diffusion coefficient.

The vertical diffusion coefficient D_v is defined by:

$$D_V = \frac{\nu_{mol}}{\sigma_{mol}} + max\left(D_{3D},\ D_h^{back}\right), \quad (14)$$

with D_{3D} the diffusion due to turbulence model in vertical direction and ν_{mol} the kinematic viscosity of water and σ_{mol} is either the (molecular) Prandtl number for heat diffusion or the Schmidt number for diffusion of dissolved matter.

The boundary conditions for the momentum equations (1) and (2) at the bed ($z = z_b$) are:

$$\frac{\nu_V}{h}\frac{\partial u}{\partial \sigma}\Big|_{\sigma=0} = \frac{1}{\rho_0}\tau_{bx}\ , \quad (15)$$

$$\frac{\nu_V}{h}\frac{\partial v}{\partial \sigma}\Big|_{\sigma=0} = \frac{1}{\rho_0}\tau_{by}\ , \quad (16)$$

with τ_{bx} and τ_{by} the components of the bed stress in x- and y-direction, respectively.

The bed shear stress in 3D is related to the current just above the bed:

$$\vec{\tau}_b = \frac{g\ \rho_0\ \vec{u}_b\ |\vec{u}_b|}{c_{3D}^2}, \quad (17)$$

with $\vec{u}_b$ the flow velocity vector in the first layer just above the bed.

The 3D-Chezy coefficient c_{3D} can be expressed in the roughness height z_0 of the bed:

$$c_{3D} = \frac{\sqrt{g}}{\kappa} ln\left(1 + \frac{\Delta z_b}{2z_0}\right), \quad (18)$$

with $\kappa \approx 0.41$ the Von Karman constant, z_0 the roughness height and Δz_b the distance to the computational grid point closest to the bed.

At the free surface ($\sigma = 1$; $z = \zeta$) the boundary conditions for the momentum equations are:

$$\frac{\nu_H}{h}\frac{\partial u}{\partial \sigma}\Big|_{\sigma=1} = \frac{1}{\rho_0}|\vec{\tau}_s|\, cos(\theta)\ , \quad (19)$$

$$\frac{\nu_H}{h}\frac{\partial v}{\partial \sigma}\Big|_{\sigma=1} = \frac{1}{\rho_0}|\vec{\tau}_s|\, sin(\theta)\ , \quad (20)$$

where θ is the angle between the wind stress vector and the direction in the local coordinate system.

Without wind, the stress at the free surface is zero. The magnitude of the wind shear-stress is determined by the following widely used quadratic expression:

$$|\vec{\tau}_s| = \rho_a c_d U_{10}^2, \quad (21)$$

where ρ_a is the density of air, U_{10} is the wind speed 10 meters above the free surface (time and space dependent), c_d is the wind drag coefficient, dependent on U_{10}.

In order to specify the wind shear stress in the model, a drag coefficient is required as well as the wind field in terms of velocity magnitude and wind direction. The user can select how the wind drag coefficient should be computed, by choosing from the various types of wind drag formulation: constant, linearly varying, piecewise linearly varying [20], etc.

In D-Flow FM the heat exchange at the free surface is modeled by taking into account the separate effects of solar (short wave) and atmospheric (long wave) radiation, and heat loss due to back radiation, evaporation and convection. The heat losses due to evaporation and convection are functions of the wind speed.

The total heat flux through the free surface reads:

$$Q_{tot} = Q_{sn} + Q_{an} - Q_{br} - Q_{ev} - Q_{co} - Q_{ev\ free} - Q_{co\ free}, \quad (22)$$

where Q_{sn} is the net incident solar radiation (short wave), Q_{an} is the net incident atmospheric radiation (long wave), Q_{br} is the back radiation (long wave), Q_{ev} is the evaporative heat flux (latent heat), Q_{co} is the convective heat flux (sensible heat), $Q_{ev\ free}$ is the evaporative heat flux (free convection latent heat), $Q_{co\ free}$ is the convective heat flux (free convection sensible heat).

At “horizontal” closed boundaries zero-flux conditions are applied. At “horizontal” open boundaries the following boundary conditions are applied, with or without diffusion on the open boundary:

1) salt, temperature and tracers:
   - inflow: user-specified Dirichlet condition;
   - outflow: homogeneous Neumann condition;
2) suspended sediment.

The model was set up to simulate the Kakhovka reservoir dam destruction and a consequent spread of polluted transient water flowing from the Dnipro-Bug estuary into the north-western Black Sea (NWBS).

In previous years, a modernized forecasting complex for real-time prediction of oceanographic conditions in the Black Sea and Azov Sea basins was developed and validated [3, 5, 22]. A model applied in this study should became an integrated part of this complex, replacing a Delft3D-FLOW model [12] as a new hydro-thermodynamic block. This enables a forecasting complex to determine the

characteristics and estimate the spatial and temporal scales of the transformed and polluted waters of the Dnipro River spread across the sea [6].

Simulation was performed on unstructured computational grid, which consisted of 22494 nodes and covers the whole Black Sea area (Figure 1). The grid has a variable resolution: from ≈ 500 m (near-shore) to 6500 m (offshore). In the vertical direction, the terrain-following σ-coordinate system with 7 non-uniform layers was applied. The bottom topography of the NWBS is shown in Figure 2.

A time period for the simulation was set to be

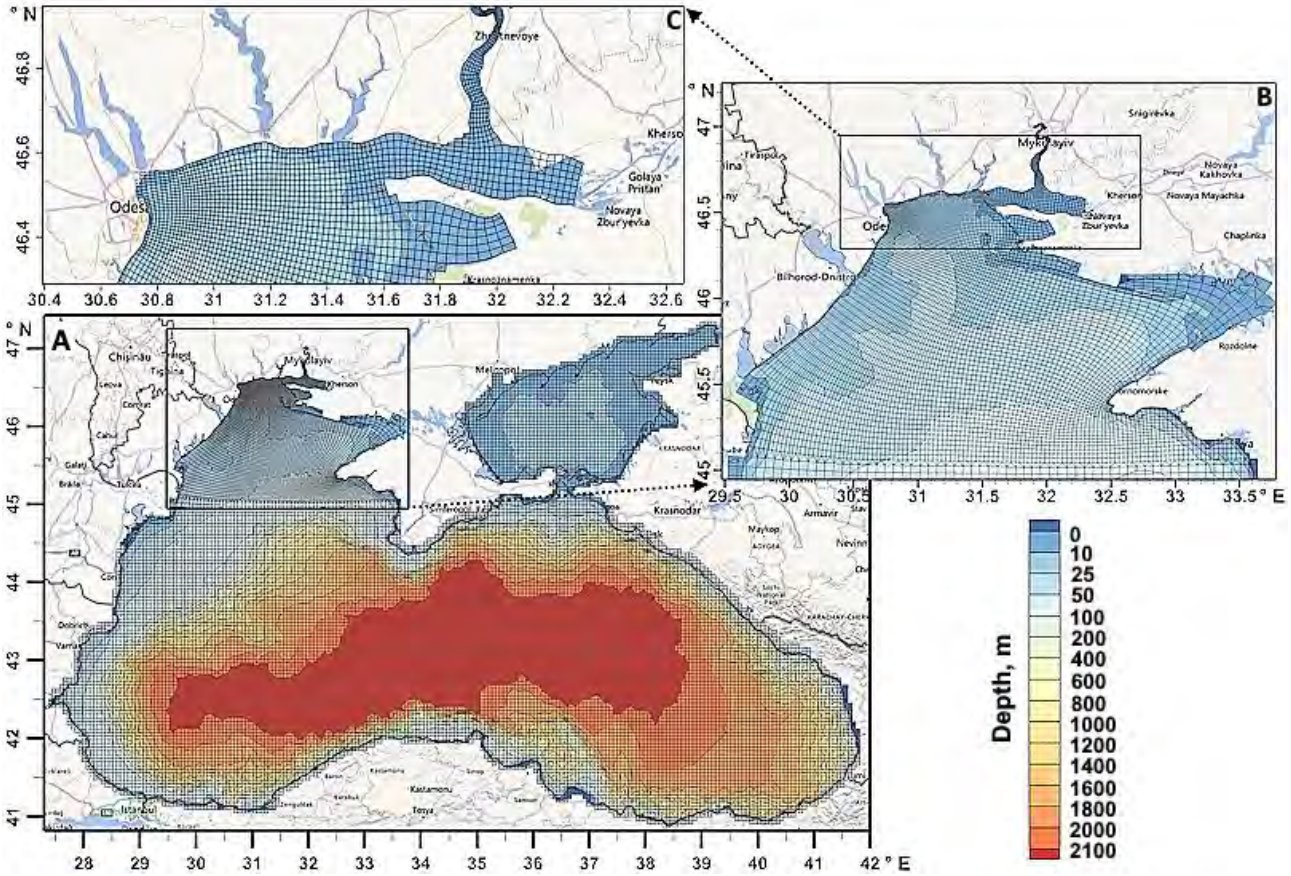


Fig. 1. Computational grid generated for the Black Sea model (A). Insets show parts of the grid in the northwestern area of the Black Sea (B) and in the Dnipro-Bug estuarine area (C)

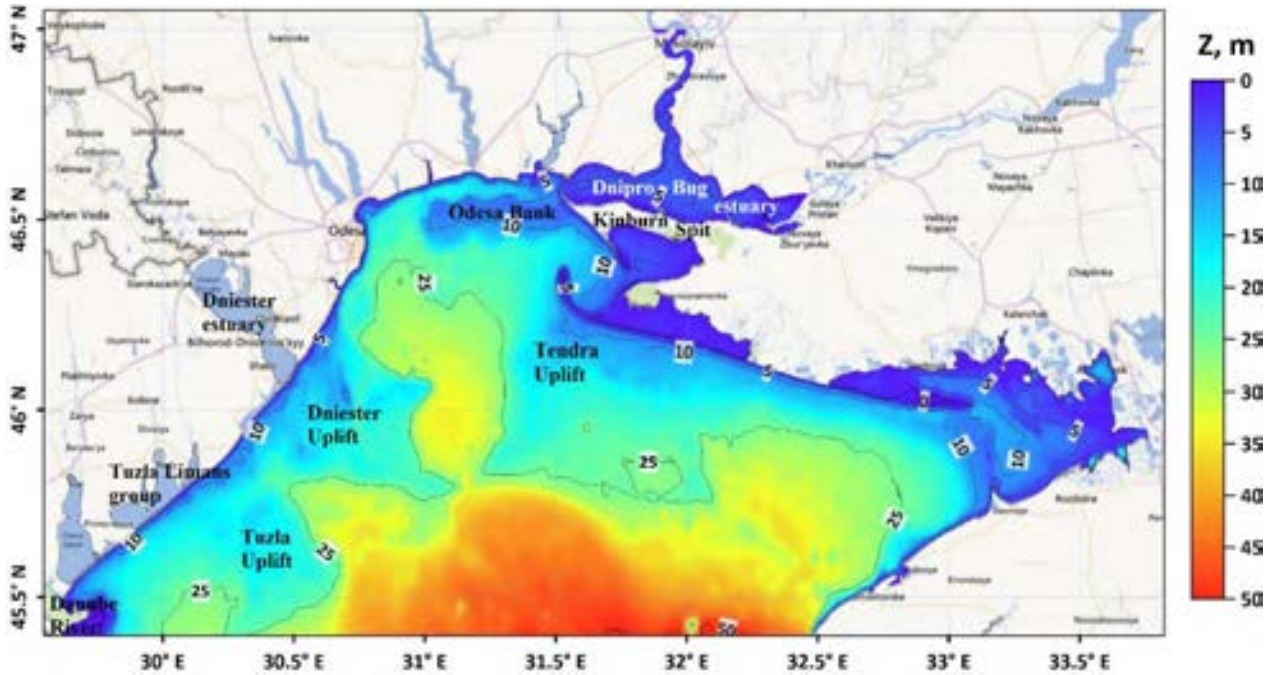


Fig. 2. Bottom topography of the north-western part of the Black Sea

from June 1 to June 30, 2023. A model time step was determined automatically based on the CFL stability criterion, within the range of time steps specified by user. The initial time step for the model was set to 1 second, and the maximum allowed time step was 30 seconds.

The model was forced by the meteorological data obtained from the NOMADS archive (National Operational Model Archive and Distribution System) of GFS Global Forecasting System for the Black Sea area [17, 21, 22].

The discharge of the Dnipro River was computed in the model from the "water level" type open boundary, imposed near the mouth of the Dnipro. The boundary conditions were set in the form of water level time-series based on observation data at the "Kherson" hydrological post (Figure 3).

Boundary conditions for water temperature were set on the basis of data obtained from the "Kyiv" hydrological station, a subdivision of Central Geophysical Observatory of Ukraine. Salt content in the riverine water was assumed to be constant (2 mg·dm^{-3}).

The freshwater discharge of the Dniester and Danube rivers, which flow into the north-western part of the Black Sea, was not taken into account in the model.

Spatially non-uniform initial fields of temperature, salinity and water level (at t = 0) were specified on the model computational grid. Historical data with a spatial resolution of 1/40°, obtained from Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS) archive [9], was used for creating these initial conditions.

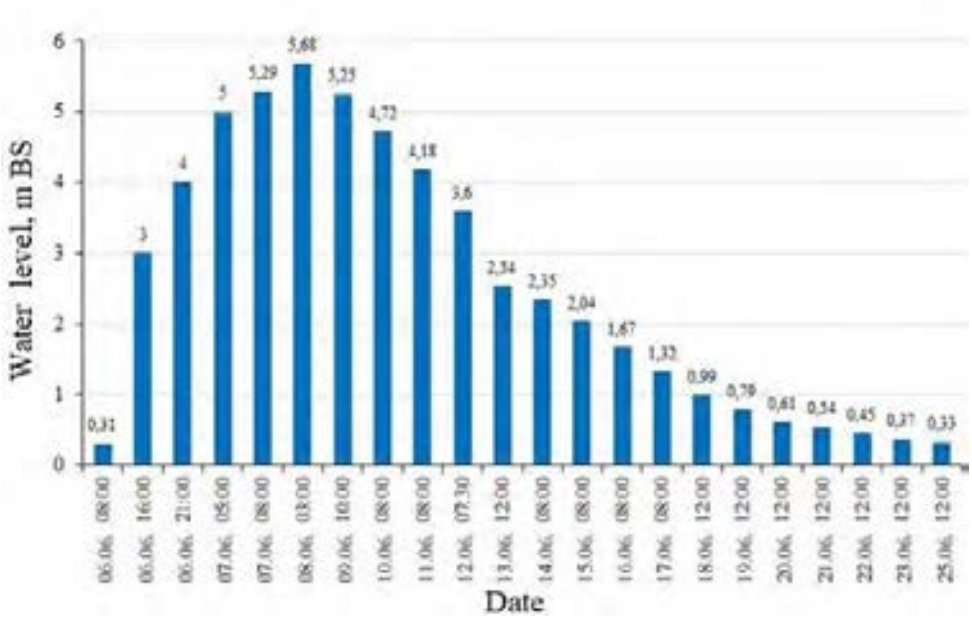


Fig. 3. Water level at the Kherson hydrological station

The model results were verified against the observational data for water salinity at the "Odesa-Port" hydro-meteorological monitoring station and satellite-derived data on sea surface colour variability and concentration of Chlorophyll *a* [6].

The spill of passive conservative contaminant with neutral buoyancy spreading across the water area of the NWBS was simulated. The concentration of contaminant was considered to be a pollution tracer which enters the sea with transitional waters from the Dnipro-Bug estuary.

Toxic pollutants dissolved in seawater, as well as mineral and organic compounds of biogenic elements can be considered as passive contaminants with neutral buoyancy at a first approximation.

In general, nutrients are not conservative, as they take part in chemical and biological processes that occur in the aquatic environment. However, taking into account large volumes of nutrient inflow into the sea with transformed transitional waters from the Dnipro-Bug estuary within a short period of time and the fact that both utilization of mineral forms of biogenic elements by phytoplankton and their regeneration due to mineralization of organic matter occur simultaneously, the concentration of the conditional contaminant can be considered as an integral indicator of the relative concentration of nutrients, at a first approximation.

The concentration of a conservative contaminant with neutral buoyancy in the Dnipro River water at the "Kherson" station was assumed to be equal to one conventional unit. Therefore, the simulation results show the concentration of conventional contaminant in the model grid cells in fractions of its concentration at the mouth of the Dnipro River, near the city of Kherson.

Additionally, the dynamics of the suspension concentration, which enters the sea with the trans-

formed river waters from the Dnipro-Buh estuary was simulated. The concentration of mineral suspension in the waters of the Dnipro River at Kherson city was assumed to be 100 conventional units. The silt particles with a diameter of 0.01 mm and density of 2000 kg·m^{-3} were considered. The rate of gravitational sedimentation of the suspension, estimated using the well-known formula for the fall speed of a sedimenting single particle under gravitational force provided by Stokes' law, was taken as ≈ 5·10^{-5} m s^{-1}.

Results and discussion. The concentration of the conventional contaminant at the surface layer and at the bottom is shown on Figs. 4 and 5, respectively. These figures demonstrate that the concentration of the conventional contaminant in seawater decreases gradually due to the action of hydrodynamic factors (basic dilution).

It can be seen from the figures that the flow of polluted transitional waters from the Dnipro-Bug estuary covers the entire water column (from surface to 15-20 m depth) not only the sub-surface layer

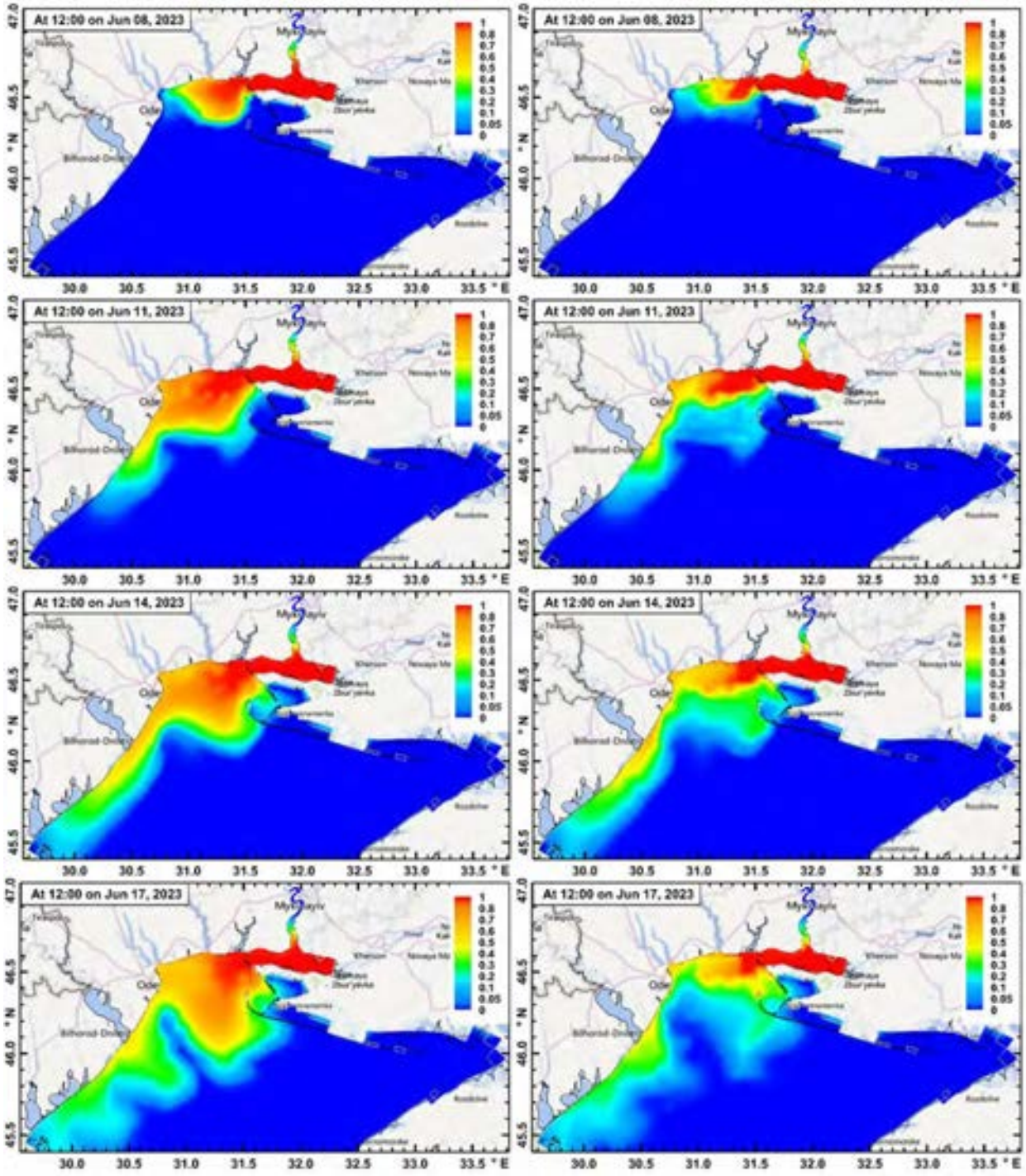


Fig. 4 Concentration of the conventional contaminant with neutral buoyancy (in conventional units; where 1 is the maximum concentration of polluted river waters) at the surface (left) and in the bottom layer (right) of the NWBS area, from June 08 to 17, 2023

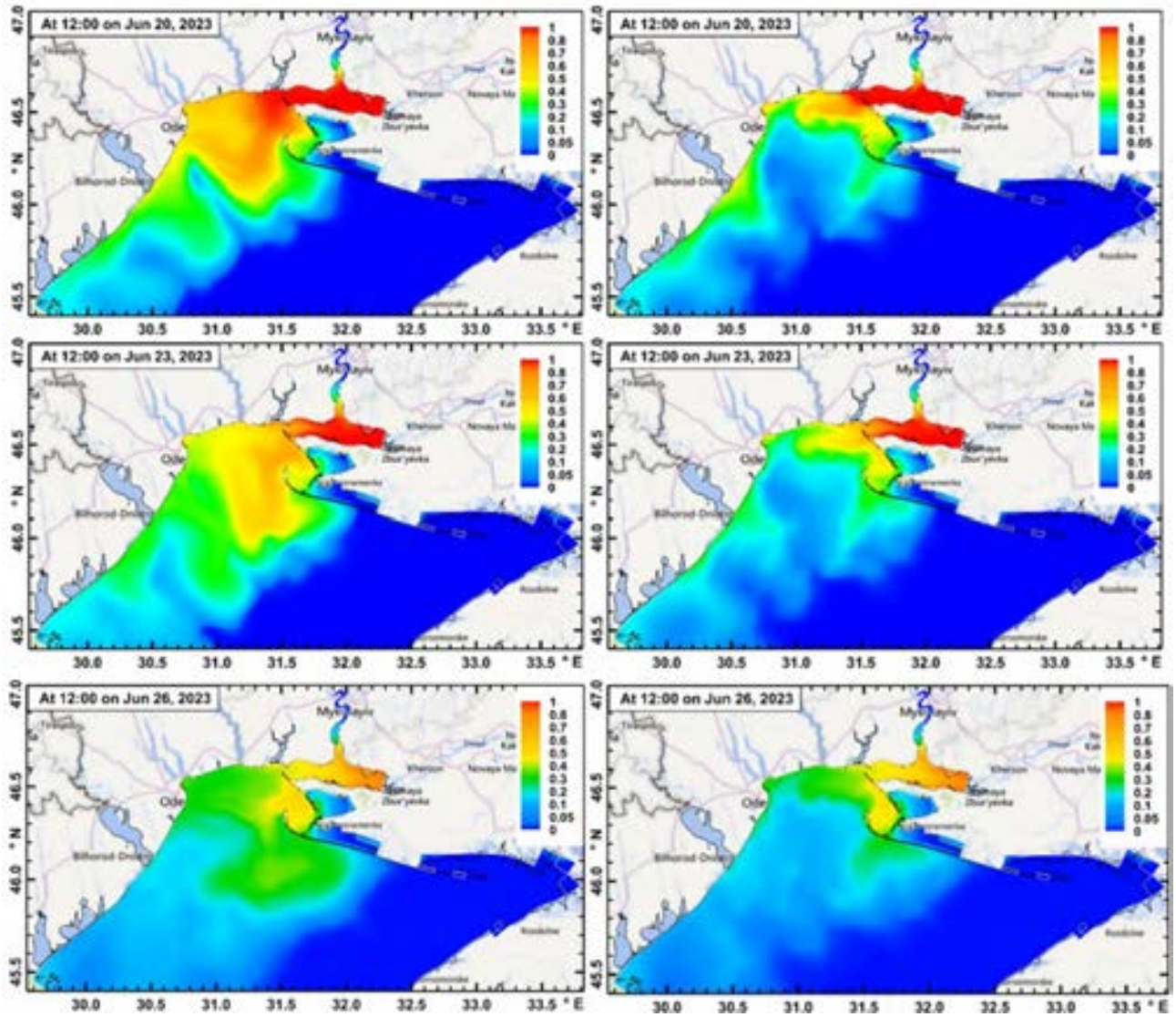


Fig. 5 Concentration of the conservative contaminant with neutral buoyancy (in conventional units; where 1 is the maximum concentration of polluted river waters) at the surface (left) and in the bottom layer (right) of the NWBS area, from June 17 to 23, 2023

(down to 5 m depth).

This was facilitated by the extra large volumes of transformed river water flown from the Dnipro River within a short period of time after dam failure. Intensive gradient currents and mixing caused by spatial velocity shifts of generated currents also contributed to this process [7].

Transformed river waters with high levels of pollutants were in contact not only with planktonic, but also with bottom sediments and benthic organisms in the water areas of the Dnipro-Bug area of the NWBS within the specified depths.

As a result, they could worsen the conditions of existence of benthic organisms, cause their suppression or death, as well as lead to accumulation of pollutants in bottom sediments due to adsorption and bioaccumulation.

The width of the plume of polluted waters and, accordingly, its area, as one could expect, is smaller in the bottom layer than at the surface. The plume of polluted waters is washed out in the near-bottom layer much more intensively than at the surface layer as well.

Analysis of modelling results indicate that the highest level of sea water pollution took place at the mouth of the Dnipro-Buh estuary and above the Odesa Bank. For example, on 11 June 2023 the concentration of conventional contaminant in these areas varied from 0.7 to 1.0 conventional unit, i.e. was equal to 70-100 % of its initial value at the mouth of the Dnipro River. A clearly visible accelerated transport of contaminant flowing along the shallow waters of the northern coast of the NWBS towards the city of Odesa is highlighted. As a result of accelerated flow of contaminant towards the Odesa Bay, a zone with increased (relative to the surrounding waters) pollution level was formed and remained there for quite a long time.

In the period from 10 to 14 June 2023, the plume with increased concentration (0.2-0.6 conventional unit) of conventional contaminant can be traced along the western coast of the NWBS area: from Odesa city to the coastal sea zone adjacent to the spit of the Tuzla Limans group (near Lebedivka village). Later on, this plume narrows to the width of the longshore current flow at the coastal area near the city of Chernomorsk (17 June 2023, Figure 4). On 17-19 June, a longshore plume with concentrations of 0.1-0.2 conventional unit reaches the Danube River mouth sector. At the same time, a broad local zone of high concentration of contaminant is formed on the Dniester site of seabed rise, which can be traced until 20 June 2023 (Figure 5).

Starting from 17 June, another plume of increased concentrations of conservative contaminant (0.2-0.6 conventional unit) was formed primarily in the sea surface layer. This plume can be observed to the south of the Odesa Bank and Kinburn Strait, along with the Tendra Uplift of bottom.

As of 26 June 2023, plumes of contaminated water at the Dniester and Tuzlivskyi sectors of seabed rise had been completely washed out. The plume located at the Tendra sector of seabed rise was still remaining, and the concentration of conditional contaminant was in range of 0.2-0.3 unit fractions there (Figure 5).

The above-described characteristics of the plume of contaminated water flowing from the Dnipro-Buh estuary were determined by water dynamics at the NWBS area, which is described in detail in the paper [7].

The obtained results of modelling the transport of contaminant with neutral buoyancy are consistent with satellite information on the colour of the sea surface, shown in Figure 6, and with those cited in [2].

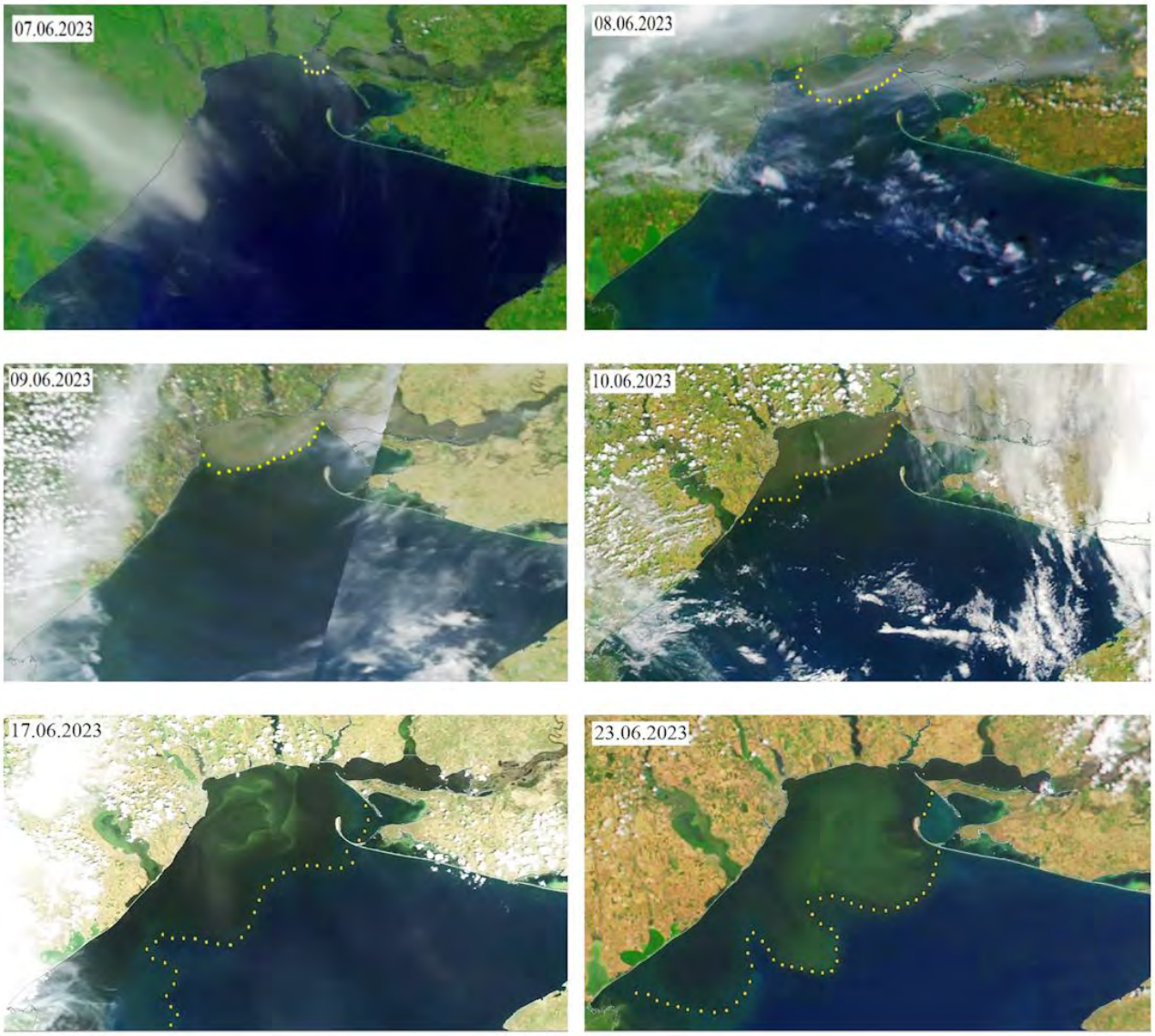


Fig. 6 Corrected colour satellite images of sea surface in the NWBS for some days in June 2023, which visualize the spread of polluted muddy waters from the Dnipro-Bug estuary. The images are constructed from multi-channel imagery by MODIS radiometer from Aqua, Terra satellites, VIIRS radiometer from Suomi NPP and NOAA-20 satellites [16]

In addition to the passive contaminant with neutral buoyancy, modelling of the dynamics of the concentration of suspended solids, which entered the sea together with transformed river waters from the Dnipro-Bug estuary, was performed.

Particles of mineral and organic sediment were stirred up from the bottom of the Kakhovka water reservoir and the Dnipro River bed by the flooding flow, which was formed after the Kakhovka dam destruction. Soils with a high humus content, industrial and household wastes, fragments of dead flora and fauna of the Dnipro River delta were washed into the lower reaches of the Dnipro and further into the sea. It should be noted that heavy metal compounds, including those that came with discharges from industrial enterprises of Zaporizhzhya and Dnipro cities, have been accumulated in the bottom sediments of the Kakhovka water reservoir for decades. Additionally, these compounds could have been adsorbed on the surface of suspended sediment particles transported with the flow of polluted river water along with hazardous chemicals of toxic action washed off from flooded areas.

The flow of muddy water with high concentration of silt particles and other suspended matter is well traced on satellite images of sea surface color on 8-10 June 2023 (Figure 6). Further, as the carrying capacity of the flow decreased, particles of organic and mineral suspended matter were deposited and accumulated in bottom sediments, together with toxic pollutants adsorbed by them, in particular, heavy metals. Because of this, in case of storm winds, bottom sediments may become a source of secondary pollution of marine waters as a result of their wind-wave resuspension.

The main objective of modelling the dynamics of mineral suspension concentration in the NWBS water area was to identify the sites with the most contaminated bottom sediment. The hypothesis was that such sites correspond to areas where the high

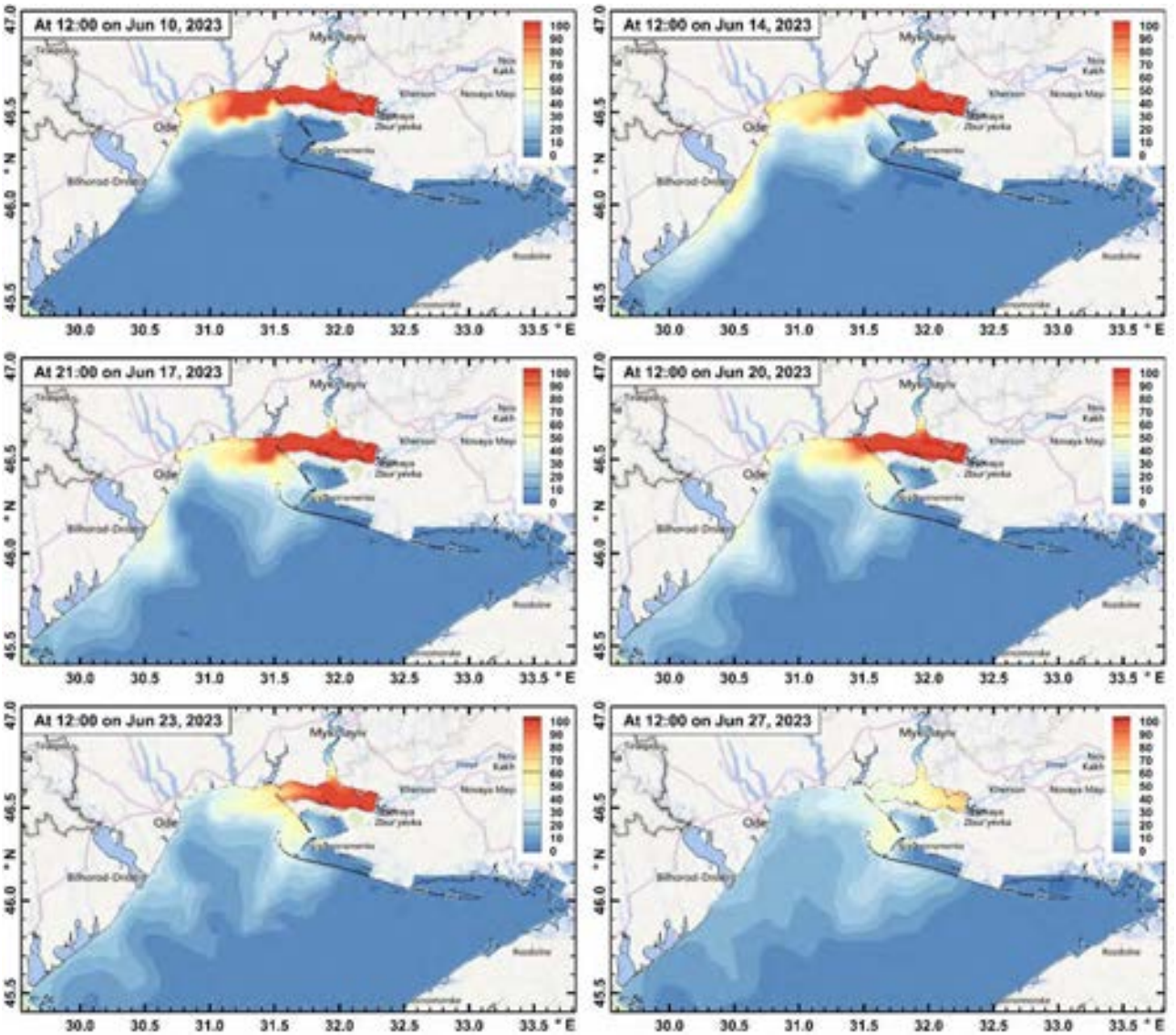


Fig. 7. Changes in the concentration of mineral suspended matter (as a percentage of its concentration at the outlet of the Dnipro River mouth in the Kherson area) in the bottom waters of the NWBS in June 2023 after the Kakhovka dam destruction

concentration of suspended solids in the bottom layer remains high for a long time.

Modelled spatial distribution of inorganic suspended matter concentration in the bottom layer of the NWBS water area is shown in Figure 7. The study of its dynamics allowed us to draw conclusions that a high level of bottom sediment pollution should be expected along the northern coast of the NWBS, on the Odesa Bank, in the Odesa Bay, along the western coast of the Odesa area of the NWBS, and in the area of the Dniester Uplift of bottom.

These conclusions are supported by data on heavy metals and petroleum products content in the bottom sediments of the coastal zone of the Odesa area in summer-autumn 2023, summarized in [19].

Conclusion. Spatial scales and relative level of sea pollution in the north-western part of the Black Sea as a result of volley inflow of large volumes of polluted transitional waters from the Dnipro-Bug estuary due to the Kakhovka dam destruction were determined. This study was performed on the basis of the analysis of mathematical modelling results, using numerical hydrodynamic model D-Flow FM.

The distribution of polluted waters was considered not only in the surface layer of the sea, which can be done on the basis of satellite information, but also in the bottom layer of the water area of NWBS.

Spreading of conservative contaminant with neutral buoyancy across the NWBS water area was simulated. It is shown that in the first week after the dam destruction the water pollution level in the Odesa area of the NWBS went down to 70% of the pollution level at the mouth of the Dnipro River near the city of Kherson. In the water area of the Danube-Dniester interfluve the water pollution reduced to a level of 20-50% of the water pollution in the mouth of the Dnipro River. These reductions of marine water pollution level were merely caused by the hydrodynamic dilution. A plume of polluted water with concentrations of the conditional contaminant 10-20% was spreading along the western coast of the NWBS and eventually reached the mouth of the Danube River.

A zone with increased (relative to the surrounding waters) pollution level is formed in the Odesa Bay and remains there for quite a long time. This ascertains the fact that the accelerated transport of contaminant along the shallow northern coast towards the city of Odesa is developed.

The results of the modelling of spatio-temporal variability of the concentration of a conservative contaminant with neutral buoyancy in the surface layer agree well with satellite images of the color of the sea surface.

The flow of contaminated water covered the entire water column from surface to bottom in the sea areas with depths down to 15 meters, which could lead to contamination of bottom sediments due to adsorption, bioaccumulation and sedimentation.

The results of modelling the dynamics of concentration of conditional contaminant with neutral buoyancy and suspended sediment in bottom layer waters allow us to make the following conclusion: higher pollution levels of sea-floor sediments should be expected along the northern and western coasts of NWBS, at the Odesa Bank, in the Odesa Bay and near the Dniester site of seabed rise. It is recommended to carry out a verificatory monitoring of water and bottom sediments contamination with toxic substances in the mentioned sea zones, especially after strong storms.

Bibliography

1. *Колодежна, В.В. & Василюк, О.В. (Ред.) (2025). Знищення Каховського водосховища: наслідки для довкілля. Чернівці: Друк Арт. ISBN 978-617-8501-02-0 (PDF) URL: https://uncg.org.ua/wp-content/uploads/2025/02/znyshhennya-kahovskogo-vodoshovyshha-naslidky-dlya-dovkillya-2025.pdf*
2. *Ільїн, Ю.П. (2023). Поширення екстремального виносу вод з Дніпровського лиману в Чорне море у червні 2023 року за даними супутникових спостережень. Метеорологія. Гідрологія. Моніторинг довкілля. 2(4), 62-74. http://doi.org/10.15407/Meteorology2023.04.062*
3. *Кушнір, Д.В., Тучковенко, Ю.С. & Попов Ю.І. (2019). Результати адаптації та верифікації комплексу інтегрованих чисельних моделей для прогнозування мінливості океанографічних характеристик в північно-західній частині Чорного моря. Український гідрометеорологічний журнал. (23), 95-108. https://doi.org/10.31481/uhmj.23.2019.09*
4. *Мінічева, Г.Г., Бондаренко, О.С., Богатова, Ю.І., Большаков, В.М., Бушуєв, С.Г., Гаркуша, О.П. та ін. (2023). Реакція морської екосистеми на наслідки руйнування греблі Каховського водосховища. Морський екологічний журнал. (1-2), 52-68. https://doi.org/10.47143/1684-1557/2023.1-2.6*
5. *Тучковенко, Ю.С., Кушнір, Д.В., Гончаренко, Р.В., Титюк Т.Г. & Щипцов, О.А.* (2020). *Автоматизований модельний комплекс для забезпечення діяльності Військово-Морських Сил України оперативними прогнозами океанографічних умов. Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України, 3 (70), 75-83. https://doi.org/10.33099/2304-2745/2020-3-70/75-83*
6. *Тучковенко, Ю.С., Кушнір, Д.В., Овчарук, В.А., Соколов, А.В. & Коморін, В.М. (2023). Особливості розповсюдження в Чорному морі розпріснених і забруднених перехідних вод з Дніпровсько-Бузького лиману після руйнування греблі Каховського водосховища. Український гідрометеорологічний журнал, (32), 95-114. https://doi.org/10.31481/uhmj.32.2023.07*

7. Тучковенко, Ю.С., Кушнір, Д.В., Торгонський, А.В. & Коморін, В.М. (2024). Вплив руйнування греблі Каховського водосховища на океанографічні умови в північно-західній частині Чорного моря за результатами моделювання. Український гідрометеорологічний журнал, (33), 66-80. https://doi.org/10.31481/uhmj.33.2024.05
8. Тучковенко, Ю.С. & Степаненко, С.М. (2023). Вплив руйнування греблі Каховської ГЕС на екологічний стан Одеського району Чорного моря. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, 44, 71-80. https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.44.71-80
9. Jansen, E., Martins, D., Stefanizzi, L., Ciliberti, S. A., Gunduz, M., Ilicak, M., Lecci, R., Cretí, S., Causio, S., Aydoğdu, A., Lima, L., Palermo, F., Peneva, E. L., Coppini, G., Masina, S., Pinardi, N., Palazov, A., & Valchev, N. (2022). Black Sea Physical Analysis and Forecast (Copernicus Marine Service BS-Currents, EAS5 system) (Version 1) [Data set]. Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS). https://doi.org/10.25423/cmcc/blksea_analysisforecast_phy_007_001_eas5 (дата звернення: 17.06.2024 р.).
10. Jiang, D., Khokhlov, V., Tuchkovenko, Y., Kushnir, D., Ovcharuk, V., Spyrakos, E., Stanica, A., Slabakova, V., & Tyler, A. (2025). The biogeochemical response of the north-western Black Sea to the Kakhovka Dam breach. Communications Earth & Environment, 6 (185). https://doi.org/10.1038/s43247-025-02153-z
11. Delft 3D FM Suite: D-Flow Flexible Mesh. Deltares. Homepage. Met kennis meer impact. Deltares. URL: https://www.deltares.nl/en/software-and-data/products/delft3d-fm-suite/modules/d-flow-flexible-mesh (дата звернення: 10.05.2025 р.).
12. Deltares (2025). Delft3D-FLOW– Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual. Hydro-Morphodynamics, Version: 4.05, Revision: 80522. Delft, the Netherlands. URL: https://content.oss.deltares.nl/delft3d4/Delft3D-FLOW_User_Manual.pdf
13. Deltares (2025). D-Flow Flexible Mesh. Computational Cores and User Interface. User Manual, Version: 2025, Revision: 80547. Delft, the Netherlands Available at: https://content.oss.deltares.nl/delft3dfm2d3d/D-Flow_FM_User_Manual.pdf
14. Kvach, Y., Stepien, C.A., Minicheva, G.G., & Tkachenko, P. (2025). Biodiversity effects of the Russia–Ukraine War and the Kakhovka Dam destruction: ecological consequences and predictions for marine, estuarine, and freshwater communities in the northern Black Sea. Ecological Processes, 14 (22). https://doi.org/10.1186/s13717-025-00577-1
15. Minicheva, G.G., Garkusha, O.P., Kalashnik, K.S., Marinets, G.V. & Sokolov, Y.V. (2025). Response of the Black Sea Planktonic and Benthic Algae to the Consequences of the Kakhovka Reservoir Dam on the Dnipro River (Ukraine) Destruction. International Journal on Algae, 27(2), 157–176.
16. NASA. (2019). Worldview Base Layers. Corrected reflectance (True Color) URL: https://worldview.earthdata.nasa.gov (дата звернення: 10.10.2023 р.)
17. National Centers for Environmental Prediction (NCEP), National Weather Service, NOAA, U.S. Department of Commerce. (2015). NCEP Global Forecasting System (GFS) 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive. NSF National Center for Atmospheric Research. https://doi.org/10.5065/D65D8PWK (дата звернення: 17.06.2024 р.).
18. Phillips, N.A. (1957) A co-ordinate system having some special advantages for numerical forecasting. Journal of Meteorology, 14, 184–185.
19. Shumilova, O., Sukhodolov, A., Osadcha, N., Oreshchenko, A., Constantinescu, G., Afanasyev, S., Koken, M., Osadchyi, V., Rhoads, B., Tockner, K., Monaghan, M.T., Schröder, B., Nabyvanets, J., Wolter, C., Lietytska, O., van de Koppel, J., Magas, N., Jähnig, S.C., Lakisova, V., Trokhymenko, G., Venohr, M., Komorin, V., Stepanenko, S., Khilchevskyi, V., Domisch, S., Blettler, M., Gleick, P., De Meester, L., Grossart, H.P. (2025). Environmental effects of the Kakhovka Dam destruction by warfare in Ukraine. Science, 387 (6739), 1181–1186. https://doi.org/10.1126/science.adn8655
20. Smith, S.D. and Banke, E.G. (1975). Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed. Quarterly Joournal of the Royal Meteorological Society, 101, 665-673.
21. The GFS Atmospheric Model. (2024). URL: http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/moorthi/gam.html (дата звернення: 17.06.2024 р.).
22. Tuchkovenko, Y. & Kushnir, D. (2021) Using the Modern Modelling Complex for Operational Forecasting of Oceanographic Conditions in the Ukrainian Part of the Sea of Azov – the Black Sea Basin. Proceedings of II International Scientific and Practical Conference «Intellectual Systems and Information Technologies» (ISIT 2021). Odesa, Ukraine. URL: https://ceur-ws.org/Vol-3126/paper26.pdf
23. Vishnevskyi, V., Shevchuk, S., Komorin, V., Oleynik, Y. & Gleick, P. (2023). The destruction of the Kakhovka dam and its consequences. Water International, 48(5), 631–647 https://doi.org/10.1080/02508060.2023.2247679

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

References

1. Vasyliuk, O.V. & Kolodezhna, V.V. (Eds.) (2025). Destruction of the Kakhovka Reservoir: Environmental Consequences. Chernivtsi: Druk Art publ. Available at: https://uncg.org.ua/wp-content/uploads/2025/02/znyshhennya-kahovskogo-vodoshovyshha-naslidky-dlya-dovkillya-2025.pdf [in Ukrainian]

2. *Ilyin Yuriy. (2023). Spreading of the extreme water discharge from the Dnipro-Buh estuary into the Black Sea in June 2023 by satellite observations data. Meteorology. Hydrology. Environmental monitoring, 2(4), 62-74. http://doi.org/10.15407/Meteorology2023.04.062*
3. *Kushnir, D.V., Tuchkovenko, Y.S., Popov, Y.I. (2019). Results of adaptation and verification of the coupled numerical models set for predicting the variation of oceanographic features in the North-Western part of the Black Sea. Ukrainian Hydrometeorological Journal, 23, 95-108. https://doi.org/10.31481/uhmj.23.2019.09 [in Ukrainian]*
4. *Minicheva, G.G., Bondarenko, O.S., Bogatova, Yu.I., Bolshakov, V.M., Bushuev, S.G., Harkusha, O.P., Diatlov, S.E., Kalashnik, K.S., Koshelev, O.V., Kudrenko, S.A., Kulakova, I.I., Marynets, H.V., Migas, R.V., Martyniuk, M.O., Nikonova, S.E., Rybalko, O.A., Synyogub, I.A., Sokolov, E.V., Stadnichenko, S.V., ... Son, M.O. (2023). Reaction of the marine ecosystem to the consequences of destruction of the Kakhovka reservoir dam. Marine ecological journal, 1-2, 52-68. https://doi.org/10.47143/1684-1557/2023.1-2.6 [in Ukrainian]*
5. *Tuchkovenko, Yu.S., Kushnir, D.V., Goncharenko, R.V., Tytiuk, T.G. & Shchyptsov, O.A. (2020) An automatized modeling complex to support the activity of the Naval Forces of Ukraine by providing the operational forecasts of oceanographic conditions. Collection of the Scientific Papers of the Centre for Military and Strategic Studies of the National Defence University of Ukraine, 3 (70), 75-83. https://doi.org/10.33099/2304-2745/2020-3-70/75-83 [in Ukrainian]*
6. *Tuchkovenko, Yu.S., Kushnir, D.V., Ovcharuk, V.A., Sokolov, A.V., Komorin, V.N. (2023). Characteristics of Black Sea dispersion of freshened and polluted transitional waters from the Dnipro-Bug estuary after destruction of the Kakhovka Reservoir dam. Ukrainian hydrometeorological journal, 32, 95-114. https://doi.org/10.31481/uhmj.32.2023.07 [in Ukrainian]*
7. *Tuchkovenko, Yu.S., Kushnir, D.V., Torgonskyi, A.V. & Komorin, V.M. (2024). The impact of the destruction of the Kakhovka reservoir dam on the oceanographic conditions in the north-western part of the Black Sea according to the results of modeling. Ukrainian hydrometeorological journal, 33, 66-80. https://doi.org/10.31481/uhmj.33.2024.05 [in Ukrainian]*
8. *Tuchkovenko Yu. and Stepanenko S. (2023) The impact of destruction of the Kakhovka dam on the environmental status of the Odesa area of the Black Sea. Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulics, 44, 71-80. https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.44.71-80 [in Ukrainian]*
9. *Jansen, E., Martins, D., Stefanizzi, L., Ciliberti, S. A., Gunduz, M., Ilicak, M., Lecci, R., Cretí, S., Causio, S., Aydoğdu, A., Lima, L., Palermo, F., Peneva, E. L., Coppini, G., Masina, S., Pinardi, N., Palazov, A., & Valchev, N. (2022). Black Sea Physical Analysis and Forecast (Copernicus Marine Service BS-Currents, EAS5 system) (Version 1) Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS). https://doi.org/10.25423/cmcc/blksea_analysisforecast_phy_007_001_eas5 (accessed June 17, 2024)*
10. *Jiang, D., Khokhlov, V., Tuchkovenko, Y., Kushnir, D., Ovcharuk, V., Spyrakos, E., Stanica, A., Slabakova, V., & Tyler, A. (2025). The biogeochemical response of the north-western Black Sea to the Kakhovka Dam breach. Communications Earth & Environment, 6 (185). https://doi.org/10.1038/s43247-025-02153-z*
11. *Delft 3D FM Suite: D-Flow Flexible Mesh. Deltares (2025). Homepage. Met kennis meer impact. Deltares.nl https://www.deltares.nl/en/software-and-data/products/delft3d-fm-suite/modules/d-flow-flexible-mesh (accessed May 10, 2025).*
12. *Deltares (2025). Delft3D-FLOW– Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual. Hydro-Morphodynamics, Version: 4.05, Revision: 80522. Delft, the Netherlands. Available at: https://content.oss.deltares.nl/delft3d4/Delft3D-FLOW_User_Manual.pdf*
13. *Deltares (2025). D-Flow Flexible Mesh. Computational Cores and User Interface. User Manual, Version: 2025, Revision: 80547. Delft, the Netherlands Available at: https://content.oss.deltares.nl/delft3dfm2d3d/D-Flow_FM_User_Manual.pdf*
14. *Kvach, Y., Stepien, C.A., Minicheva, G.G., & Tkachenko, P. (2025). Biodiversity effects of the Russia–Ukraine War and the Kakhovka Dam destruction: ecological consequences and predictions for marine, estuarine, and freshwater communities in the northern Black Sea. Ecological Processes, 14 (22). https://doi.org/10.1186/s13717-025-00577-1*
15. *Minicheva, G.G., Garkusha, O.P., Kalashnik, K.S., Marinets, G.V. & Sokolov, Y.V. (2025) Response of the Black Sea Planktonic and Benthic Algae to the Consequences of the Kakhovka Reservoir Dam on the Dnipro River (Ukraine) Destruction. International Journal on Algae, 27(2), 157–176.*
16. *NASA. (2019). Worldview: Explore Your Dynamic Planet. Nasa.gov. https://worldview.earthdata.nasa.gov (accessed Oct 10, 2023)*
17. *National Centers for Environmental Prediction, National Weather Service, NOAA, U.S. Department of Commerce. (2015). NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive. NSF National Center for Atmospheric Research. https://doi.org/10.5065/D65D8PWK (accessed June 17, 2024)*
18. *Phillips, N. A. (1957) A co-ordinate system having some special advantages for numerical forecasting. Journal of Meteorology, 14, 184–185.*
19. *Shumilova, O., Sukhodolov, A., Osadcha, N., Oreshchenko, A., Constantinescu, G., Afanasyev, S., Koken, M., Osadchyi, V., Rhoads, B., Tockner, K., Monaghan, M.T., Schröder, B., Nabyvanets, J., Wolter, C., Lietytska, O., van de Koppel, J., Magas, N., Jähnig, S.C., Lakisova, V., ... Grossart, H.P. (2025) Environmental effects of the Kakhovka Dam destruction by warfare in Ukraine. Science, 387 (6739), 1181–1186. https://doi.org/10.1126/science.adn8655*
20. *Smith, S.D. and Banke, E.G. (1975). Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed. Quarterly Joournal of the Royal Meteorological Society, 101. 665–673.*

21. *The GFS Atmospheric Model description. (2024). Noaa.gov. https://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/moorthi/gam.html (accessed June 17, 2024)*
22. *Tuchkovenko, Y. & Kushnir, D. (2021) Using the Modern Modelling Complex for Operational Forecasting of Oceanographic Conditions in the Ukrainian Part of the Sea of Azov – the Black Sea Basin. ISIT 2021: II International Scientific and Practical Conference «Intellectual Systems and Information Technologies». CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org). Odesa, Ukraine. Available at: https://ceur-ws.org/Vol-3126/paper26.pdf*
23. *Vishnevskyi, V., Shevchuk, S., Komorin, V., Oleynik, Y. & Gleick, P. (2023). The destruction of the Kakhovka dam and its consequences. Water International, 48(5), 631–647. https://doi.org/10.1080/02508060.2023.2247679*

Оцінка масштабів забруднення моря внаслідок руйнування дамби Каховського водосховища на основі результатів моделювання

Юрій Тучковенко [1]
д. геогр. н., професор, гол. наук. співробітник,
[1] Інститут біології моря НАН України, Одеса, Україна;
Дмитро Кушнір [2]
к. геогр. н., наук. співробітник,
кафедра військової підготовки
[2] Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,
Одеса, Україна

Обговорюється проблема визначення можливих зон акумуляції в донних відкладах північно-західної частини Чорного моря забруднюючих речовин, що надійшли до моря в червні 2023 року з водами річки Дніпро внаслідок руйнування греблі Каховського водосховища. Актуальність проблеми визначається тим, що ці зони є потенційними довготривалими джерелами вторинного забруднення морського середовища. Їхня попередня ідентифікація необхідна для планування моніторингу якості морського середовища після завершення воєнних дій з метою оцінювання шкоди, завданої природним ресурсам моря, та врахування під час обґрунтування шляхів для досягнення доброго екологічного стану морських акваторій. Оскільки через військові дії, що тривають, проведення контактних досліджень у відкритому морі та на деяких ділянках прибережної зони неможливе, то для визначення цих зон використовуються результати чисельного математичного моделювання. Приймається гіпотеза, що зони акумуляції забруднювальних речовин в донних відкладах відповідають тим областям акваторії моря, де їхня концентрація в водах придонного шару була високою. Для вирішення вищезазначеної задачі використовувалась гідротермодинамічна модель Delft3D-Flow Flexible Mesh (Deltares). Моделювалося поширення умовної домішки нейтральної плавучості та завісі, що надходила із забрудненими перехідними водами з Дніпровсько-Бузького лиману протягом червня 2023 року. Стік Дніпра задавався на основі спостережених у порту Херсон змін відміток рівня води. При моделюванні умовна концентрація домішки нейтральної плавучості у гирлі річки Дніпро (Херсон) приймалася рівною 1 умовній одиниці, а завісі – 100. Гравітаційна швидкість осадження частинок завісі приймалася рівною 5×10^{-5} м $с^{-1}$. Мінливість метеорологічних умов на верхній (з атмосферою) границі розрахункової області задавалася на основі даних, зчитаних з архіву прогнозів глобальної моделі прогнозу погоди GFS. Результати дослідження дали змогу оцінити просторові масштаби та відносний рівень забруднення морських вод не тільки в поверхневому шарі моря, що можна зробити на основі супутникової інформації, а й у придонному шарі акваторії північно-західної частини Чорного моря. Це дало змогу виділити зони, де забруднення донних відкладів може бути значним, і вони можуть бути потенційним джерелом вторинного забруднення морського середовища в майбутньому внаслідок ресуспендування. У таких зонах рекомендовано провести контрольний моніторинг забруднення вод і донних відкладів після завершення військових дій.

Ключові слова*: руйнування греблі, Каховське водосховище, річка Дніпро, Дніпровсько-Бузький лиман, Чорне море, північно-західна частина, забруднення, первинне і вторинне, моделювання.*

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу
Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 11 червня 2025 р.
Прийнята 20 жовтня 2025 р.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ, ЩО ПОДАЮТЬСЯ ДО «ВІСНИКА ХАРКІВСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ»

До «Вісника Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», приймаються наукові статті обсягом біля 40 тис. знаків, присвячені дослідженням у галузях геології, геохімії, гідрогеології, географії, економічної та соціальної географії, екології, а також суміжних дисциплін. Матеріали можуть бути представлені українською або англійською мовами. Перевага надається англомовним статтям. Рішення про публікацію приймається редакційною колегією „Вісника", при цьому кожна стаття рецензується двома вченими-фахівцями у даній тематиці. Українськими авторами стаття надсилається українською мовою і перекладається після рецензування.

Матеріали подаються в електронному вигляді та надсилаються на електронну пошту geoeco-series@karazin.ua. Електронна версія оформлюється у форматі Microsoft Word, шрифт Times New Roman, розмір 14, міжрядковий інтервал 1,5, всі поля по 2 см, відступ для абзацу – 0,75 см. **Жирним** шрифтом виділяються підзаголовки у статті. Ілюстрації, включаючи графіки і схеми, мають бути розміщені безпосередньо в тексті, а також подані окремими файлами. Неприпустимо включати підписи до самого рисунка. У статті не дозволяється використовувати чужі рисунки, а також власні, що раніше були опубліковані, без письмового дозволу авторів або журналу-правовласника. Виключеннями є геологічні карти та власні схеми (із обов'язковим посиланням на джерело). Скрізь, де можливо, доцільніше використовувати графіки, а не таблиці. Орієнтація сторінок – книжкова. Вирівнювання слід робити по ширині сторінки. Якщо стаття українською, є необхідним дублювання підписів до рисунків та назв таблиць і діаграм англійською.

Оригінальна *дослідницька стаття* (*оглядові статті* до розгляду не приймаються) має бути підготовлена з використанням **IMRAD**-структури (introduction, methods, results, and discussion) та містити такі основні елементи:

Вступ (Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями, актуальність, мета, об'єкт та предмет дослідження; Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання порушеної проблеми, на які спирається автор, обов'язково повинна бути розглянута література за останні п'ять років, включена до наукометричних баз Scopus та WoS; Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття).

Методи

Результати

Дискусія і висновки

Для статей необхідно вказати *УДК*, подати *назву* (до 10 слів), *анотацію* (1800-2500 знаків) та *ключові слова* (8-10).

На окремому аркуші надається *інформація про авторів* (прізвище, ім'я та по-батькові, повна назва організації, посада, вчений ступінь і звання, поштова адреса, телефон, e-mail, ORCID) українською й англійською мовами. *Список використаних джерел* оформлюється мовою оригіналу згідно міжнародного стандарту APA (American Psychological Association). Перелік повинен містити не менше ніж 20 посилань. Також обов'язково необхідно додавати номери DOI (за наявності). Літературні посилання нумеруються в порядку цитування в тексті, номер посилання пишеться у квадратних дужках. Не допускаються посилання на неопубліковані роботи, звіти, дисертації, підручники та навчальні посібники.

Також є необхідним розгорнутий *реферат англійською мовою*, теж оформлений за структурою IMRAD. Реферат повинен мати:

– обсяг 2500-3500 знаків,

– змістовність (відображати головний зміст статті та результати досліджень),

– структурованість (наявність обов'язкових елементів: *вступ* (передумови, актуальність, мета, об'єкт та предмет дослідження); *методи*; *результати*; *висновки; ключові слова*).

Після реферату необхідно навести *References* – перекладений англійською список використаних джерел. В кінці джерела вказується мова оригіналу в квадратних дужках, наприклад [in Ukrainian].

Рукописи, не оформлені належним чином, не приймаються до публікації.

Редакція залишає за собою право проводити редакційну правку рукопису.

При підтвердженні позитивного рішення на публікацію статті, автор має оформити та надіслати згоду на публікацію та оприлюднення персональних даних.

The «VISNYK OF V.N. KARAZIN KHARKIV NATIONAL UNIVERSITY»
AUTHOR GUIDELINES

The series “Geology. Geography. Ecology”, accepts scientific articles of about 40 thousand characters devoted to research in the fields of geology, geochemistry, hydrogeology, geography, economic and social geography, ecology, as well as related disciplines. Materials can be submitted in Ukrainian or English. The decision on publication is made by the editorial board of the Bulletin, with each article being reviewed by two scientists in the field.

Materials are submitted in electronic form and sent to geoeco-series@karazin.ua. The electronic version should be in Microsoft Word, Times New Roman font, size 14, line spacing 1.5, all margins 2 cm, paragraph indentation 0.75 cm. Subheadings in the article should be bolded. Illustrations, including graphs and diagrams, should be placed directly in the text and submitted as separate files. It is unacceptable to include captions to the figure itself. It is not allowed to use other people's figures, as well as your own, previously published, without the written permission of the authors or the copyright holder. Exceptions are geological maps and your own diagrams (with a mandatory reference to the source). Wherever possible, it is more appropriate to use graphs rather than tables. Page orientation is portrait. Alignment should be done along the width of the page.

The original *research article* (*review articles* are not accepted for consideration) should be prepared using the **IMRAD** structure (introduction, methods, results, and discussion) and contain the following main elements:

Introduction (Formulation of the problem in general and its connection with important scientific or practical tasks, relevance, purpose, object and subject of research; Analysis of recent research and publications that have initiated the solution of the problem raised, on which the author relies, the literature of the last five years included in the Scopus and WoS scientometric databases must be considered; Identification of previously unresolved parts of the general problem to which the article is devoted).

Methods

Results

Discussion and **conclusions**

For articles, it is necessary to indicate the *UDC*, submit a *title* (up to 10 words), *abstract* and *keywords* (8-10).

Information about the authors (surname, name and patronymic, full name of the organization, position, academic degree and title, postal address, telephone, e-mail, ORCID) should be provided on a separate sheet in Ukrainian and English. The *list of references* should be in the original language according to the international standard APA (American Psychological Association). The list should contain at least 20 references. DOI numbers (if available) must also be added. Literary references are numbered in the order of citation in the text, the reference number is written in square brackets. References to unpublished papers, reports, dissertations, textbooks, and manuals are not allowed.

A detailed *abstract* in English is also required, that follows the IMRAD standard structure. The abstract should

- be between 2500-3500 characters,
- represent the content (represent the research findings and the article's main content),
- include the following elements: *introduction* (background, relevance and purpose of the study); *methods*; *results*; *conclusions*; *keywords*).

The abstract should be followed by References - a list of references translated into English. At the end of the source, the original language is indicated in square brackets, for example, [in Ukrainian].

Manuscripts that are not properly formatted will not be accepted for publication.

The editors reserve the right to make editorial changes to the manuscript.

Upon confirmation of a positive decision to publish the article, the author is required to sign and submit a consent form granting permission for the publication and disclosure of personal information.

Зразок оформлення статті :

https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-08
UDC 528.8+551.4
Received 13 April 2023
Accepted 22 May 2023

Integrating remote sensing and aeromagnetic data for lithological and structural lineaments mapping in Abu Ghaylan - Kiklah - Tighrinna, northwest Libya

Nureddin Saadi [1]
PhD (Geological Engineering), Lecturer, Department of Geological Engineering,
[1] University of Tripoli, Tripoli, Libya,
e-mail: n.saadi@uot.edu.ly, https://orcid.org/0000-0003-0593-8578;
Ousama Elkoul [2]
…

ABSTRACT

Problems Statement and Purpose. Libya is the fourth-largest country in Africa and the seventeenth-largest country in the world with area of 1,759,540 sq. km. Most of Libya is located in the Sahara Desert and known for being the driest and most remote regions with limited accessibility. …

Keywords*: Libya, Remote Sensing, Digital Elevation, Lineaments, Lithological Mapping, Aeromagnetic, Data Integration.*

Introduction

Integration approach of multi-source data can improve geological interpretation and provide detailed information on unexplored areas [1–3]. The remote sensing satellites (sensors) can detect and map geological surface based on the spectral and spatial resolution [4, 5]. …

References

1. *Thiele, S.T., Lorenz, S., Kirsch, M., Cecilia Contreras Acosta, I., Tusa, L., Herrmann, E., Möckel, R., Gloaguen, R. (2021). Multi-Scale, Multi-Sensor Data Integration for Automated 3-D Geological Mapping. Ore Geology Reviews, 136, 104252. DOI: https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104252*

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Інтеграція дистанційного зондування та аеромагнітних даних для картографування літологічних і структурних ліній в Абу-Гайлан - Кікла - Тігрінна, північно-західна Лівія

Нуреддін Сааді [1]
д. філософії (геологічна інженерія), викладач кафедри геологічної інженерії,
[1] Університет Тріполі, Тріполі, Лівія;
Усама Елкул [2]
...

У 1970-х роках Центр промислових досліджень у Лівії розпочав створювати геологічні карти всіх лівійських земель, отриманих з аналогових (друкованих) аерофотознімків і геологічних польових поїздок у деякі доступні місця. …

Ключові слова*: Лівія, дистанційне зондування, цифровий рельєф, лінеаменти, літологічне картування, аеромагнітний, інтеграція даних.*

Список використаних джерел

1. *Multi-Scale, Multi-Sensor Data Integration for Automated 3-D Geological Mapping / S.T. Thiele et al. Ore Geology Reviews. 2021. Vol. 136. P. 104252. DOI: https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104252*

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу
Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів
Надійшла 23 квітня 2023 р.
Прийнята 12 травня 2023 р.

© *Saadi Nureddin, … , 2023*

Наукове видання

ВІСНИК
ХАРКІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
імені В. Н. КАРАЗІНА

серія
«ГЕОЛОГІЯ. ГЕОГРАФІЯ. ЕКОЛОГІЯ»

Випуск 63

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

Українською та англійською мовами

Редактор В. Г. Суярко
Технічний редактор О. В. Чуєнко
Комп'ютерне верстання О. В. Чуєнко
Відповідальний за випуск В. Г. Суярко

Підписано до друку 24.11.2025 р. Формат 60x84/8. Папір офсетний.
Друк цифровий. Ум. друк. арк. 61,5. Обл.-вид. арк. 71,3.
Наклад 100 пр. Зам. № 48/25. Ціна договірна.

Видавець та виготовлювач
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,
61022, Харків, майдан Свободи, 4.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3367 від 13.01.09.