

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”

[illegible]

Випуск 62

◁ ▷ ◁ ▷ ◁ ▷ ◁ ▷ ◁ ▷ ◁ ▷ ◁ ▷ ◁ ▷ ◁ ▷ ◁ ▷ ◁ ▷ ◁ ▷

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 № 14 від 26.05.2025 р.).

Редакційна колегія:

д. геол.-мін. н., проф. **В. Г. Суярко** (голова редколегії); **О. В. Чуєнко** (відповідальний секретар); д. геол. н., проф. **О. В. Барташук**; 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. Немець**; 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** (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** (Інституту 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).

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. 14 dated 26/05/2025).

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, 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, Ilyia** – DSc (Technical), Professor, Head of the Department of Oil, Gas and Condensate Production, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; **Khokha, Yuriy** – 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).

З М І С Т

ГЕОЛОГІЯ

<i>Балогланов Ельнур, Йолчуєва Ульвія, Ахундов Руслан, Самедов Ельмар, Мустафаєв Камал</i> МІНЕРАЛОГІЧНІ ТА ГЕОХІМІЧНІ ПОКАЗНИКИ МІОЦЕНОВИХ ВІДКЛАДЕНЬ СХІДНОГО АЗЕРБАЙДЖАНУ: ПОХОДЖЕННЯ ТА НАФТОНОСНІСТЬ [in English] ...	11
<i>Барташук Олексій, Суярко Василь, Чуєнко Олександр</i> ТЕКТОНІЧНА ЕВОЛЮЦІЯ ВНУТРІШНЬОПЛИТНИХ СТРУКТУР САРМАТІЇ У ФАНЕРОЗОЇ. 2. ТЕКТОНІЧНІ КАРКАСИ ДЕФОРМАЦІЙ	25
<i>Ищенко Ігор, Якушин Леонід</i> ДО ПИТАННЯ ПРО МІСЦЕВІ СТРАТИГРАФІЧНІ ПІДРОЗДІЛИ КРЕЙДОВИХ ВІДКЛАДІВ УКРАЇНСЬКОГО СЕКТОРА ПІВНІЧНО-ЗАХІДНОГО ШЕЛЬФУ ЧОРНОГО МОРЯ. СТАТТЯ 1. НИЖНЯ КРЕЙДА	50
<i>Литвиненко Юлія</i> ПЕГМАТИТИ МОКРОМОСКОВСЬКОГО ГРАНІТНОГО МАСИВУ	59
<i>Матвеев Андрій, Шевчук Олена</i> СТРАТИГРАФІЯ ЮРСЬКОЇ СИСТЕМИ РАЙОНУ СЕЛА КАМ'ЯНКА. ЧАСТИНА 3. ПІДЛУЖНА СВІТА	72
<i>Михайловський Ігор, Андрейчук Михайло</i> АЛЬТЕРНАТИВНИЙ ПОГЛЯД НА УМОВИ ФОРМУВАННЯ ДОНЕОГЕНОВОГО ЛОЖА КРУКЕНИЦЬКОЇ ЗАПАДИНИ	85
<i>Намазли Нурлан, Абдулла-заде Мурад</i> ГЕОЛОГІЧНА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ ХВИЛЬОВОГО ПОЛЯ У МЕЗОЗОЙСЬКИХ І КАЙНОЗОЙСЬКИХ ОСАДОВИХ КОМПЛЕКСАХ ПЕРЕХІДНОЇ ЗОНИ МІЖ ПІВДЕННОКАСПІЙСЬКИМ І СЕРЕДНЬОКАСПІЙСЬКИМ БАСЕЙНАМИ МЕТОДОМ СЕЙСМОСТРАТИГРАФІЧНОГО АНАЛІЗУ [in English]	95
<i>Павлюк Мирослав, Шлапінський Володимир, Савчак Олеся, Тернавський Мирослав</i> НОВІ ПОГЛЯДИ НА ГЕОЛОГІЮ БАЧАВСЬКО-БОРЖАВСЬКОГО СУБПОКРИВУ ДУКЛЯНСЬКО-ЧОРНОГОРСЬКОГО ПОКРИВУ	104
<i>Пушкар'єв Олександр, Севрук Ірина, Шраменко Іван, Зубко Олександр, Вітер Володимир</i> МІГРАЦІЯ ТРИТІО У КОМПОНЕНТАХ ПРИРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА	112
<i>Хіلال Наджм Аль-Дін Монер, Комарія, Рамелан Арі Хандоно, Нода Кейго</i> МОНІТОРИНГ ЗМІН У ЗАПАСАХ ПІДЗЕМНИХ ВОД ЗА ДОПОМОГОЮ СУПУТНИКОВОЇ МІСІЇ ЕКСПЕРИМЕНТ З ВІДНОВЛЕННЯ ГРАВІТАЦІЇ ТА КЛІМАТУ (GRACE): ТЕМАТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ОКРУГУ СРАГЕН, ІНДОНЕЗІЯ [in English]	127

ГЕОГРАФІЯ

Байрак Галина

ОСНОВНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ СУЧАСНОЇ МОРФОДИНАМІКИ РІЧОК КАРПАТСЬКОГО РЕГІОНУ	146

Генішюрек Фуркан, Нємець Людмила, Шахін Мехмет Тахсин, Сегіда Катерина

ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ УРБАНІСТИЧНОГО РОЗВИТКУ ТА СТАЛЕ УПРАВЛІННЯ ЛАНДШАФТАМИ: KEYС МУРАТПАШІ, АНТАЛІЯ [in English]	160

Денисик Григорій, Атаман Людмила, Денисик Богдан

ДОРОЖНЯ ЛАНДШАФТНО-ІНЖЕНЕРНА СИСТЕМА КИЇВ-ОДЕСА: ФУНКЦІОНУВАННЯ, СУЧАСНИЙ ГЕОХІМІЧНИЙ СТАН, ПРОБЛЕМИ РАЦІОНАЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ	174

Ібрагімова Лейла, Іманов Хусейн

РОЛЬ ЛАНДШАФТУ У ФОРМУВАННІ РІЧКОВОГО СТОКУ В НАХІЧЕВАНСЬКІЙ АВТОНОМНІЙ РЕСПУБЛІЦІ [in English]	184

Ісмайлов Мирнух, Кучинська Ірина, Карімова Еліна

ВПЛИВ ВІЙСЬКОВИХ КОНФЛІКТІВ НА ТРАНСФОРМАЦІЮ ЛАНДШАФТУ (НА ПРИКЛАДІ АГДАМСЬКОГО РАЙОНУ АЗЕРБАЙДЖАНСЬКОЇ РЕСПУБЛІКИ) [in English]	194

Корогода Наталія, Купач Тетяна

ТЕХНОЛОГІЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО ОЦІНЮВАННЯ ТА КАРТОГРАФУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МІСЬКИХ ЗЕЛЕНИХ ЗОН У ЗНИЖЕННІ РІВНЯ АВТОМАГІСТРАЛЬНОГО ШУМУ	205

Костріков Сергій

АНАЛІЗ ЗМІН МІСЬКОЇ МОРФОЛОГІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ [in English]	219

Кравченко Катерина

МІСЬКА АГЛОМЕРАЦІЯ: СУСПІЛЬНО-ГЕОГРАФІЧНА КОНЦЕПЦІЯ В ПЕРСПЕКТИВІ СТАЛОГО РОЗВИТКУ [in English]	237

Маханта Анвеша, Боргохайн Паріджат

ПОБУДОВА ІНДЕКСУ ЖИТТЄЗДАТНОСТІ МІСТА ТА ОЦІНКА ПРОСТОРОВОЇ МОДЕЛІ ЖИТТЄЗДАТНОСТІ МІСТА ГУВАХАТІ [in English]	257

Москаленко Станіслав

АНАЛІЗ І ОЦІНКА ГРАНИЧНИХ ІНТЕНСИВНОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ МАКСИМАЛЬНОГО СТОКУ ВОДИ РІЧОК ПРАВОБЕРЕЖЖЯ ТА ЛІВОБЕРЕЖЖЯ ДНІСТРА	273

Пасько Володимир, Масляк Петро, Уліганець Сергій, Шинкаренко Уляна

ВИКОРИСТАННЯ ЗЕМЕЛЬНИХ РЕСУРСІВ ДЛЯ ПРОМИСЛОВОГО БУДІВНИЦТВА (В МЕЖАХ МАЛІНСЬКОЇ ОТГ)	287

Прокоф'єв Олег, Гончарова Людмила

АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ПІВНІЧНО-ЗАХІДНОГО
ПРИЧОРНОМОР'Я В КОНТЕКСТІ ГЛОБАЛЬНИХ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН [in English] .. 298

Расулзаде Вусала

ОЦІНКА ПОТЕНЦІАЛУ ВІТРОВОЇ ТА ХВИЛЬОВОЇ ЕНЕРГІЇ
В АКВАТОРІЇ КАСПІЙСЬКОГО МОРЯ [in English] 315

Роман Василь, Карабінюк Микола, Мигаль Андрій, Кічура Анастасія, Чепур Світлана

ЛОКАЛЬНА ГЕОІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ЗЕМЕЛЬ ЛІСОВОГО ФОНДУ:
МЕТОДИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ, ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ
ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ 324

Сержантова Юлія, Брусенцова Наталія, Залюбовська Оксана

ГЕОЕКОЛОГІЧНА КЛАСИФІКАЦІЯ УГІДЬ ЗА КАТЕГОРІЯМИ ЦІННОСТІ
ДЛЯ ПРОЖИВАННЯ РАТИЧНИХ (ARTIODACTYLA):
ЗАСТОСУВАННЯ ГІС-ТЕХНОЛОГІЙ 337

Таріхазер Стара

МОРФОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ В ПРИБЕРЕЖНІЙ ЗОНІ КАСПІЙСЬКОГО МОРЯ
(ГОБУСТАН, АЗЕРБАЙДЖАН): ПОШИРЕННЯ ТА РИЗИКИ ПРОЯВУ [in English] 347

Гусейнов Джамал, Тагієв Аллахверді, Ісмаїлова Мехрібан

ХАРАКТЕРИСТИКА СУЧАСНОГО ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОГО РОЗПОДІЛУ
АТМОСФЕРНИХ ОПАДІВ У ПІВДЕННІЙ ТА ПІВДЕННО-СХІДНІЙ ЧАСТИНАХ
РЕГІОНУ ВЕЛИКОГО КАВКАЗУ [in English] 360

Гусейнова Байімханім

ЕТНОДЕМОГРАФІЧНІ АСПЕКТИ СТАРІННЯ НАСЕЛЕННЯ В АЗЕРБАЙДЖАНІ
(НА ПРИКЛАДІ ШЕКІ-ЗАГАТАЛЬСЬКОГО ЕКОНОМІЧНОГО РАЙОНУ) [in English] ... 372

ЕКОЛОГІЯ

Безсонний Віталій, Третьяков Олег, Плячук Леонід, Пономаренко Роман, Давидова Оксана

СЕЗОННО-ПРОСТОРОВА ДИНАМІКА ЕНТРОПІЙНО-ЗВАЖЕНОЇ
ОЦІНКИ ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ ВОД УКРАЇНИ 384

Боярин Марія, Некос Алла, Радзій Володимир, Нетробчук Ірина,

Коцун Лариса, Луговська Марія

ВПЛИВ ВИДОБУВАННЯ ТОРФОСИРОВИНИ З ТОРФОВИЩ
ВЕРХІВ'Я БАСЕЙНУ РІЧКИ ПРИП'ЯТЬ НА ДОВКІЛЛЯ [in English] 401

Касімов Олександр, Удалов Ігор, Кононенко Аліна

ОЦІНКА СТУПЕНЯ ЗАБРУДНЕННЯ СЕРЕДНЬОЇ ТЕЧІЇ Р. ДНІПРО
ТА РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ЙОГО МІНІМІЗАЦІЇ 412

Ковальчук Іван, Караїм Ольга, Джам Олена, Лавринюк Зоряна, Караїм Володимир

ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ ВОД РІЧКИ ЗАХІДНИЙ БУГ
У МЕЖАХ ПРИКОРДОННЯ УКРАЇНИ ТА ПОЛЬЩІ 424

Максименко Надія, Пересадько Віліна, Гречко Аліна, Бурченко Світлана, Скриган Анна

ЗЕЛЕНА ІНФРАСТРУКТУРА МІСТ УКРАЇНИ

В КОНТЕКСТІ ЄВРОПЕЙСЬКОГО ЗЕЛЕНОГО КУРСУ [in English] 437

Приходько Вероніка, Сафранов Тамерлан

ОЦІНКА ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ

ВІД МІСЦЬ ЗАХОРОНЕННЯ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИХ ІНДИКАТОРІВ 452

Ухань Ольга, Білецька Світлана, Осадча Наталія, Лузовіцька Юлія

РОЗРАХУНОК БАЛАНСУ БІОГЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

У ҐРУНТАХ АГРОЕКОСИСТЕМИ Р. РОСЬ 462

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ,

ЩО ПОДАЮТЬСЯ ДО «ВІСНИКА ХАРКІВСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ» 473

CONTENT

GEOLOGY

<i>Baloglanov Elnur, Yolchuyeva Ulviyya, Akhundov Ruslan, Samedov Elmar, Mustafayev Kamal</i> MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL PROXIES OF MIOCENE SEDIMENTS OF EASTERN AZERBAIJAN: PROVENANCE AND OIL-BEARING	11
<i>Bartaschuk Oleksii, Suyarko Vasyi, Chuienko Oleksandr</i> TECTONIC EVOLUTION OF THE INTRA-PLATE STRUCTURES OF SARMATIA IN THE PHANEROZOIC. 2. TECTONIC FRAMEWORKS OF DEFORMATIONS	25
<i>Ishchenko Ihor, Yakushyn Leonid</i> TO THE QUESTION OF LOCAL STRATIGRAPHIC SUBDIVISIONS OF CRETACEOUS SEDIMENTS OF THE UKRAINIAN SECTOR OF THE NORTH- WESTERN SHELF OF THE BLACK SEA. ARTICLE 1. LOWER CRETACEOUS	50
<i>Lytvynenko Yuliia</i> PEGMATITES OF THE MOKROMOSKOVSK GRANITE PLUTON	59
<i>Matveev Andriy, Shevchuk Olena</i> JURASSIC SYSTEM STRATIGRAPHY AT THE KAMIANKA VILLAGE. PART 3. THE PIDLUZHNA FORMATION	72
<i>Mykhailovskyi Ihor, Andreychuk Mykhailo</i> AN ALTERNATIVE VIEW OF THE CONDITIONS OF THE FORMATION OF THE PRE-NEOGENE BED OF THE KRUKENYTSKA BASIN	85
<i>Namazli Nurlan, Abdulla-zade Murad</i> GEOLOGICAL INTERPRETATION OF THE WAVE FIELD IN MESOZOIC AND CENOZOIC SEDIMENTARY COMPLEXES OF THE TRANSITION ZONE BETWEEN THE SOUTH CASPIAN AND MIDDLE CASPIAN BASINS USING SEISMOSTRATIGRAPHIC ANALYSIS METHOD	95
<i>Pavlyuk Myroslav, Shlapinsky Volodymyr, Savchak Olesya, Ternavsky Myroslav</i> NEW VIEWS ON THE GEOLOGY OF THE BACHAV-BORZHAV SUBCOVER OF THE DUKLYAN-MONTEREN COVER	104
<i>Pushkarov Oleksandr, Sevruk Iryna, Shramenko Ivan, Oleksandr Zubko, Volodymyr Viter</i> MIGRATION OF TRITIUM IN THE COMPONENTS OF THE NATURAL ENVIRONMENT	112
<i>Hilal Najm Al-Deen Moneer, Komariah, Ramelan Ari Handono, Noda Keigo</i> MONITORING GROUNDWATER STORAGE CHANGES USING THE GRAVITY RECOVERY AND CLIMATE EXPERIMENT (GRACE) SATELLITE MISSION: A CASE STUDY OF SRAGEN REGENCY, INDONESIA	127

GEOGRAPHY

<i>Bayrak Galyna</i> MAIN PATTERNS OF MODERN RIVER MORPHODYNAMICS OF THE CARPATHIAN REGION	146

<i>Genişyürek Furkan, Niemets Liudmyla, Şahin Mehmet Tahsin, Sehida Kateryna</i> ENVIRONMENTAL IMPACTS OF URBAN DEVELOPMENT AND SUSTAINABLE LANDSCAPE MANAGEMENT: THE CASE OF MURATPAŞA, ANTALYA	160
<i>Denysyk Hrigoriy, Ataman Liudmyla, Denysyk Bogdan</i> ROAD LANDSCAPE AND ENGINEERING SYSTEM KYIV-ODESA: FUNCTIONING, CURRENT GEOCHEMICAL STATE, PROBLEMS OF RATIONAL USE	174
<i>Ibrahimova Leyla, Imanov Huseyn</i> THE ROLE OF LANDSCAPE IN THE FORMATION OF RIVER FLOW IN THE NAKHCHIVAN AUTONOMOUS REPUBLIC	184
<i>Ismayilov Mirnuh, Kuchinskaya Irina, Karimova Elina</i> IMPACT OF MILITARY CONFLICTS ON LANDSCAPE TRANSFORMATION (A CASE STUDY FOR THE AGHDAM DISTRICT OF THE REPUBLIC OF AZERBAIJAN)	194
<i>Korohoda Nataliia, Kupach Tetiana</i> TECHNOLOGY FOR GEOINFORMATION ASSESSMENT AND MAPPING OF THE EFFECTIVENESS OF URBAN GREEN SPACES IN MOTORWAY NOISE REDUCING ...	205
<i>Kostrikov Sergiy</i> ANALYZING URBAN MORPHOLOGY CHANGES USING NEURAL NETWORKS	219
<i>Kravchenko Kateryna</i> URBAN AGGLOMERATION: HUMAN-GEOGRAPHICAL CONCEPT IN THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT PERSPECTIVE	237
<i>Mahanta Anwasha, Parijat Borgohain</i> CONSTRUCTING A CITY LIVEABILITY INDEX AND EVALUATING THE SPATIAL PATTERN OF LIVEABILITY OF GUWAHATI CITY	257
<i>Moskalenko Stanislav</i> 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	273
<i>Pasko Volodymyr, Maslyak Petro, Ulihanets Serhii, Shynkarenko Ulyana</i> USE OF LAND RESOURCES FOR INDUSTRIAL CONSTRUCTION (WITHIN MALYNSKA UTC)	287
<i>Prokofiev Oleg, Goncharova Liudmyla</i> ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF THE TEMPERATURE REGIME OF THE NORTH-WESTERN BLACK SEA REGION IN THE CONTEXT OF GLOBAL CLIMATE CHANGES	298
<i>Rasulzadeh Vusala</i> ASSESSMENT OF THE WIND AND WAVE ENERGY POTENTIAL IN THE WATER AREA OF THE CASPIAN SEA	315
<i>Roman Vasyl, Karabiniuk Mykola, Mihaly Andriy, Kichura Anastasia, Chepur Svitlana</i> LOCAL GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM OF FORESTRY LANDS: METHODOLOGICAL FEATURES OF CREATION, PRACTICAL ASPECTS AND PROSPECTS OF USE	324

<i>Serzhantova Yuliia, Brusentsova Nataliia, Zaliubovska Oksana</i> GEOECOLOGICAL CLASSIFICATION OF LANDS BY CATEGORIES OF VALUE FOR THE HABITAT OF ARTIODACTYLA: EXPERIENCE WITH THE APPLICATION OF GIS TECHNOLOGIES	337
<i>Tarikhazer Stara</i> MORPHODYNAMIC PROCESSES IN THE COASTAL ZONE OF THE CASPIAN SEA (GOBUSTAN, AZERBAIJAN): DISTRIBUTION AND RISKS OF MANIFESTATION ...	347
<i>Huseynov Jamal, Tagiyev Allahverdi, Mehriban Ismayilova</i> CHARACTERISTICS OF THE CONTEMPORARY SPATIOTEMPORAL DISTRIBUTION OF ATMOSPHERIC PRECIPITATION IN THE SOUTHERN AND SOUTHEASTERN PARTS OF THE GREATER CAUCASUS REGION	360
<i>Huseynova Bayimkhanim</i> ETHNO-DEMOGRAPHIC ASPECTS OF POPULATION AGING IN AZERBAIJAN (IN A CASE STUDY FOR THE SHAKI-ZAGATALA ECONOMIC REGION)	372

ECOLOGY

<i>Bezsonnyi Vitalii, Tretyakov Oleg, Plyatsuk Leonid, Ponomarenko Roman, Davydova Oksana</i> SEASONAL AND SPATIAL DYNAMICS OF ENTROPY-WEIGHTED WATER QUALITY ASSESSMENT IN SURFACE WATERS OF UKRAINE	384
<i>Boiaryn Maria, Nekos Alla, Radzii Volodymyr, Netrobchuk Iryna, Kotsun Larisa, Lugowska Maria</i> IMPACT OF PEAT EXTRACTION FROM THE PEATLANDS OF UPPER PRIPYAT BASIN ON THE ENVIRONMENT	401
<i>Kasimov Oleksandr, Udalov Igor, Kononenko Alina</i> ASSESSMENT OF THE DEGREE OF POLLUTION OF THE MIDDLE REACHES OF THE DNIPRO RIVER AND DEVELOPMENT OF MEASURES TO MINIMIZE IT	412
<i>Kovalchuk Ivan, Karaim Olha, Dzham Olena, Lavrynyuk Zoryana, Karaim Volodymyr</i> ECOLOGICAL ASSESSMENT OF SURFACE WATER QUALITY OF THE WESTERN BUG RIVER IN THE BORDER REGION OF UKRAINE AND POLAND	423
<i>Maksymenko Nadiya, Peresadko Vilina, Hrechko Alina, Burchenko Svitlana, Skryhan Hanna</i> GREEN INFRASTRUCTURE OF UKRAINIAN CITIES IN THE CONTEXT OF THE EUROPEAN GREEN DEAL	437
<i>Prykhodko Veronika, Safranov Tamerlan</i> ASSESSMENT OF THE TECHNOGENIC PRESSURE FROM SOLID WASTE DISPOSAL SITES USING SPATIAL AND TEMPORAL INDICATORS	452
<i>Ukhan Olha, Byletska Svitlana, Osadcha Nataliia, Yuliia Luzovitska</i> CALCULATION OF NUTRIENTS BALANCE IN THE SOILS OF THE ROS RIVER AGROECOSYSTEM	462

SUBMISSION TO THE «VISNYK OF V.N. KARAZIN KHARKIV NATIONAL UNIVERSITY». AUTHOR GUIDELINES	473

ГЕОЛОГІЯ

<https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-01>

UDC 552.14+553.98

Received 12 February 2025

Accepted 17 March 2025

Mineralogical and geochemical proxies of Miocene sediments of Eastern Azerbaijan: Provenance and oil-bearing

*Elnur Baloglanov*¹

Researcher of Department of Mud Volcanism, ¹ Institute of Geology and Geophysics, Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan, e-mail: b.elnur2016@gmail.com,  <https://orcid.org/0009-0004-3620-0052>;

Ulviyya Yolchuyeva^{2,3}

PhD (Chemistry), Associate Professor, Head of Laboratory, ² Institute of Petrochemical Processes of Ministry of Science and Education Republic of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan; Department of Chemical Engineering, School of Engineering and Applied Science,

³ Khazar University, Baku, Azerbaijan,

e-mail: u.jeyhunzade@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0003-4419-1016>;

*Ruslan Akhundov*¹

Researcher of Department of Mud Volcanism,

e-mail: ruslanaxundoff@gmail.com,  <https://orcid.org/0009-0003-6447-1952>;

*Elmar Samedov*¹

Engineer of Department of Mud Volcanism,

e-mail: samedovelmarm@gmail.com,  <https://orcid.org/0009-0002-6835-0229>;

*Kamal Mustafayev*⁴

Manager, ⁴ AZLAB Exploration and Research Center, Baku, Azerbaijan,

e-mail: kamal@azlab.az,  <https://orcid.org/0009-0001-4945-8683>

ABSTRACT

Problem statement. This study explores unconventional hydrocarbon resources in East Azerbaijan, focusing on oil-bearing rocks in the Cheyildere and Gyrgyshlag-Girdagh areas. It examines the spatial and temporal distribution of minerals and chemical compositions in Miocene formations. Terrigenous quartz types identified in the Maikop (Lower Miocene), Chokrak (Lower Miocene), and Diatom (Middle to Upper Miocene) formations provide insights into sedimentological maturity. Geochemical classification and tectonic discriminant diagrams help interpret the protoliths of these sediments. The study also evaluates how mineralogy and moisture affect oil-bearing potential, offering useful data for future exploration and resource management.

Purpose. This study aims to explore the genesis and potential of oil-bearing deposits of the Miocene age in East Azerbaijan by characterizing the geological, mineralogical, and geochemical proxies of samples collected from outcrops across various regions.

Methods. The mineralogical composition of samples was analyzed using a MiniFlex 600 diffractometer. Chemical composition was determined using S8 TIGER Series 2 and Agilent 7700 Series ICP-MS spectrometers.

Results. The geological characteristics of oil-bearing deposits from the Miocene stratigraphic unit were thoroughly analyzed, providing new insights into the distribution patterns of oil-bearing formations and strata within the studied areas. The mineralogical composition was examined in detail, focusing on the spatial and temporal variations in mineral distribution across different formations of Miocene. The chemical composition reveals significant differences between formations in terms of elemental signatures. The study of the chemical proxies enabled the identification of specific terrigenous quartz types. Additionally, the research assessed the influence of mineralogical composition, moisture and oil content on the oil-bearing capacity. The results demonstrated a clear relationship between the mineralogical characteristics and the oil-bearing potential of the rocks.

Conclusions. The Chokrak Formation is of particular interest due to its significant oil-bearing potential, with total thicknesses of up to 40 meters in Miocene outcrops studied in the areas of Cheyildere and Gyrgyshlag-Girdagh. Compared to other areas, the Chokrak Formation is dominated by quartz minerals (>70%), while the oil-bearing rocks of this formation contain fewer clay minerals and no carbonate minerals. The Upper Maikop deposits are characterized by calcite, and the Diatom deposits by dolomite.

Most oil-bearing rocks of Maikop and Diatom age correlate with greywacke and litharenite, while Chokrak rocks with higher silicon content show a connection with subarkose and sublitharenites. For Diatom oil-bearing rocks, in addition to quartzitic sedimentary sources, some moderate and acidic magmatic rocks can also be considered. Chokrak horizon deposits, rich in quartz, have a more mature mineralogical nature. These deposits, associated with passive continental margins, are typically linked to the interior of cratons or recycled orogenic regions, suggesting long-distance transport.

Relatively moist samples containing clay and carbonate minerals exhibit a significantly higher oil accumulation potential than samples with high quartz content. From this perspective, the marly rocks of the Meotis are of particular interest.

Keywords: Miocene, oil-bearing rock, mineralogy, geochemistry, classification, sedimentological maturity, provenance area and oil-bearing capacity.

© Baloglanov Elnur, Yolchuyeva Ulviyya, Akhundov Ruslan, Samedov Elmar, Mustafayev Kamal, 2025

In cites: Baloglanov Elnur, Yolchuyeva Ulviyya, Akhundov Ruslan, Samedov Elmar, Mustafayev Kamal (2025). Mineralogical and geochemical proxies of Miocene sediments of Eastern Azerbaijan: Provenance and oil-bearing. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (62), 11-24. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-01>

Introduction and research status. The hydrocarbon-generating deposits of Eastern Azerbaijan belong to the Paleogene-Miocene (Maikop) [6; 21], while the oil and gas reservoirs are part of the Productive Series (Pliocene). Numerous studies have been conducted on the geochemistry, and oil and gas potential of sediments identified as source rocks for hydrocarbons [4; 9; 11; 22]. There are detailed results of studies on the genesis and reservoir properties of Pliocene deposits, which currently contain more than 90% of the oil produced in Azerbaijan [13; 14]. In addition, several studies focused on the Paleogene-Miocene deposits of Eastern Azerbaijan provide a general understanding of the genesis of these sediments through the analysis of mineralogical-geochemical and petrographic data [15; 18].

The literature review highlights that, within the reservoir sediments of East Azerbaijan, the Pliocene Productive Series deposits have received the most attention. However, the genesis of older sediments, including Miocene oil-bearing rocks, which are predominantly studied as source rocks for hydrocarbons, has not been sufficiently explored. Furthermore, the mineralogical and other factors influencing the hydrocarbon potential of these sediments have not been adequately assessed. This study aims to address these gaps by focusing on the oil-bearing reservoir rocks of the Lower Maikop, Chokrak, and Diatom formations of the Miocene.

Geology and tectonics: a general overview. During the Cenozoic era, alongside the formation of oil shale [1; 7; 25] and oil and gas, there was a significant development of mud volcanoes in Eastern Azerbaijan [3; 12; 16; 17; 28] which was closely linked to the process of intense sedimentation [27]. The Shamakhi-Gobustan oil and gas region, characterized by a high concentration of tectonic faults and mud volcanoes [24], provides an ideal setting for studying the surface deposits of oil-bearing rocks [2; 10]. Numerous outcrops of oil-bearing rocks of different geological ages have been recorded in the tectonic zones of this region. The focus of this study is on the Cheyildere (Southern Gobustan) and Gyrgyshlag-Girdagh (Central Gobustan) areas (see Fig. 1), located in two separate tectonic zones of Gobustan, where oil-bearing rocks of the Lower, Middle and Upper Miocene are widespread.

Cheyildere. This area is located on the southern limb of the Cheildagh anticline, which extends in its widest direction, covering the extreme eastern part of the Sundi-Cheildagh anticlinorium zone in South Gobustan [26]. The characteristic deposits of this region include Paleogene, Miocene, and Pliocene strata. The

area is also home to the Western and Eastern Cheildagh mud volcanoes (Fig. 2).

Gyrgyshlag-Girdagh. Tectonically, the studied area is considered part of a tectonic structure consisting of the Donguzdug-Shakhgay anticlines, within which distinct structures such as the Gyrgyshlag and Girdagh are identified [30]. The geological structure includes Maikop and Quaternary deposits (Fig. 3). The Gyrgyshlag is an uplift trending northwest-southeast. The core of this structure consists of Maikop deposits, where thick clay layers alternate with thin layers of sand and sandstone, with a thickness of up to 3.5 meters. The Maikop deposits on the flanks of the fold are surrounded by layers of Chokrak and Diatom deposits. In the Gyrgyshlag area, three major outcrops of dense oil manifestations have been identified alongside mud volcanic gryphons. These exposures are associated with Diatom (Meotian) dolomites. In the case of the Girdagh structure, located about 2 kilometres north of Girdagh Mountain, there is a mud volcano of the same name. The core of the Girdagh fold consists of Maikop-aged deposits. The anticline is asymmetrical and oriented along a latitudinal strike.

Oil-bearing deposits. In Cheildere, the oil-bearing rocks of Miocene age, particularly from the Upper Maikop and Chokrak formations, are of significant interest (Fig. 4A and 4B).

Significant deposits of oil sands from the Chokrak Formation are observed on the southern limb of the Cheyildagh fold, on the right and left slopes of the ravines in the Cheyildere valley. The thickness of the sandstone layers, primarily observed on the right slopes of ravines along the valley and areas with high oil concentrations, reaches several tens of meters, and in some places, it even extends up to 40 meters. These thick bituminous sections gradually dip, extending roughly towards the Eastern Cheyildagh mud volcano. In addition to the slopes, the directions of bedding of the oil-bearing sandstone layers are clearly visible in certain water-washed areas of the valley. In the Cheyildere area, several active oil-seeping gryphons have led to the formation of a hardened bitumen cover on the surface. This phenomenon suggests a high oil-bearing potential of the underlying layers at lower intervals.

The secondary oil-bearing area of Cheyildere is situated south of the West Cheildagh mud volcano and west of the East Cheyildagh mud volcano. This area is characterized by several layers exhibiting varying degrees of bituminosity. The sand layers of the Upper Maikop Formation extend along the valley in a northwest-southeast orientation.

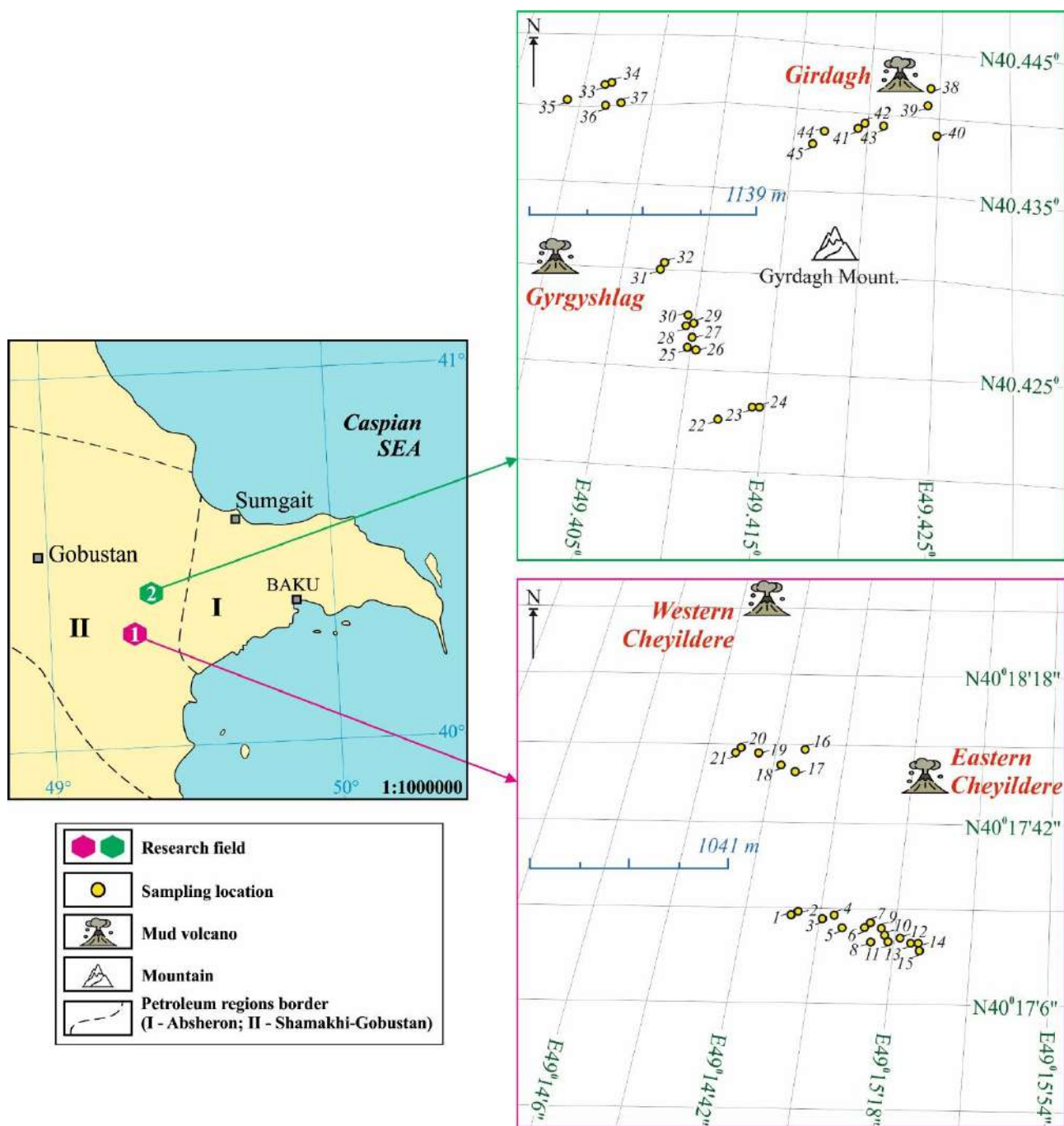


Fig. 1. Location map of study areas

Oil-bearing rocks in the Gyrgyshlag-Girdagh area are primarily associated with the sandstones of the Chokrak deposits (Fig. 5A). Of particular interest are the oil seeps in the marl rocks, which are linked to the Diatom Formation, especially in regions where mud volcanoes emitting oil are present (Fig. 5B).

Oil-bearing layers in the Gyrgyshlag-Girdagh area, which extend approximately 3.5 km in a north-west-southeast direction, are part of the Chokrak Formation. These layers are found along the northeastern limb of the fold of the same name and are divided into several distinct units, each containing significant volumes of oil. Additionally, to the north of the Gyrgyshlag wintering site and Girdagh mountain, strong oil

flows are observed within the interlayers of Diatom-aged marly rocks, extending from west to east. The most substantial oil flows in the Gyrgyshlag-Girdagh region are associated with marly rock formations.

Samples and analyzes. Fig. 1 shows the sample locations from the studied areas. A total of 45 samples were analyzed for this study. The visual assessment analysis indicates that the Chokrak samples from Cheyildere contain a higher sand content compared to the Maikop samples (Table 1). Notably, the Maikop samples have a significantly higher proportion of fine-grained fractions. The Chokrak samples from the Gyrgyshlag area contain negligible amounts of clays. In contrast, the oil content in the Diatom-aged

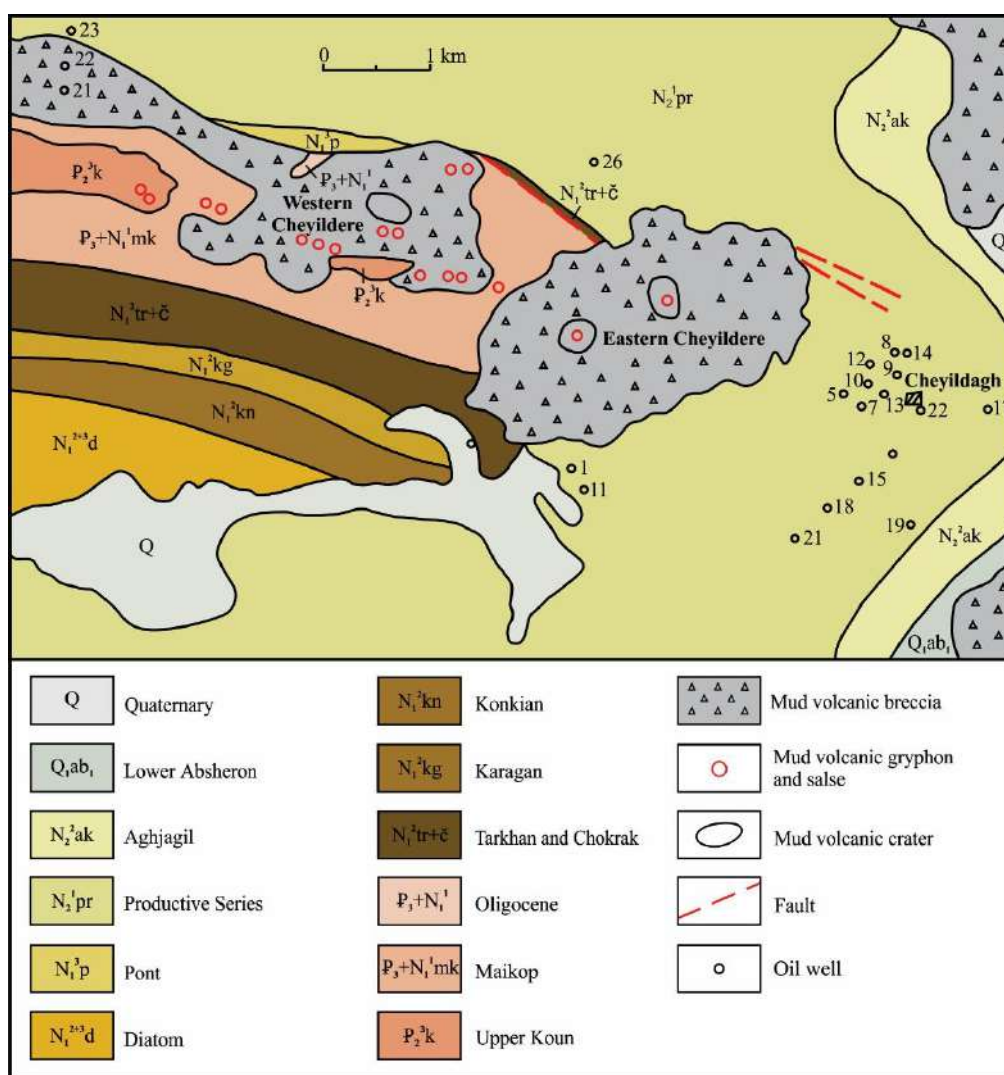


Fig. 2. Geological map of the Cheyildere area [5]

marl samples from the same area significantly surpasses that of the Chokrak samples. These marl samples are also characterized by a higher presence of clay compounds in addition to carbonates. Visual analysis suggests that the oil capacity of the fractured Diatom-aged rocks is comparable to, and in some cases even exceeds, that of the sandy rocks found in Chokrak and Maikop.

The mineralogical composition of oil-bearing samples was determined using X-ray diffraction (XRD) with a Rigaku MiniFlex 600. Samples were wet-ground to approximately 5 μm and mounted on zero-background holders. Diffraction patterns were acquired over a 2θ range of 5–65° using Cu–K α radiation (40 kV, 15 mA) and a D/tex detector, with 0.02° steps and a scan rate of 2°/min. Data analysis was performed using CRYSTAL IMPACT's Match! software, and mineral abundances were quantified using RockJock XRD pattern fitting [9].

Bulk rock geochemistry was determined via wavelength-dispersive X-ray fluorescence spectrometry (WDXRF) on a Bruker S8 TIGER Series 2. Samples were prepared using a hydraulic press at 25 tons.

Loss on ignition (LOI) was measured at 1000 °C. Data quality was validated by analyzing the certified reference material SRM 2709 [9].

The loss-on-ignition (LOI) method was employed to quantify moisture and organic matter content in the samples. Samples were dried at 105°C for 24 hours to eliminate moisture, and then combusted at 550°C using a SNOL 30/1100 muffle furnace (50–1100°C). Moisture and oil percentages were determined from weight loss measurements. Triplicate analyses were performed to guarantee reproducibility.

Mineralogy. The mineralogical analysis results are in good agreement with the visual assessments. The Chokrak samples show the highest concentration of quartz (>70%), lower concentration of clay minerals, including montmorillonite, illite and kaolinite (<10%), and no detectable carbonates. The Gyrgy-shlag-Girdagh samples exhibit relatively lower clay minerals than Cheyildere. The Upper Maikop samples are characterized by the presence of calcite, while dolomite is a distinguishing feature of the Diatom-aged samples. Additionally, the Diatom samples exhibit a significant clay mineral content, as illustra-

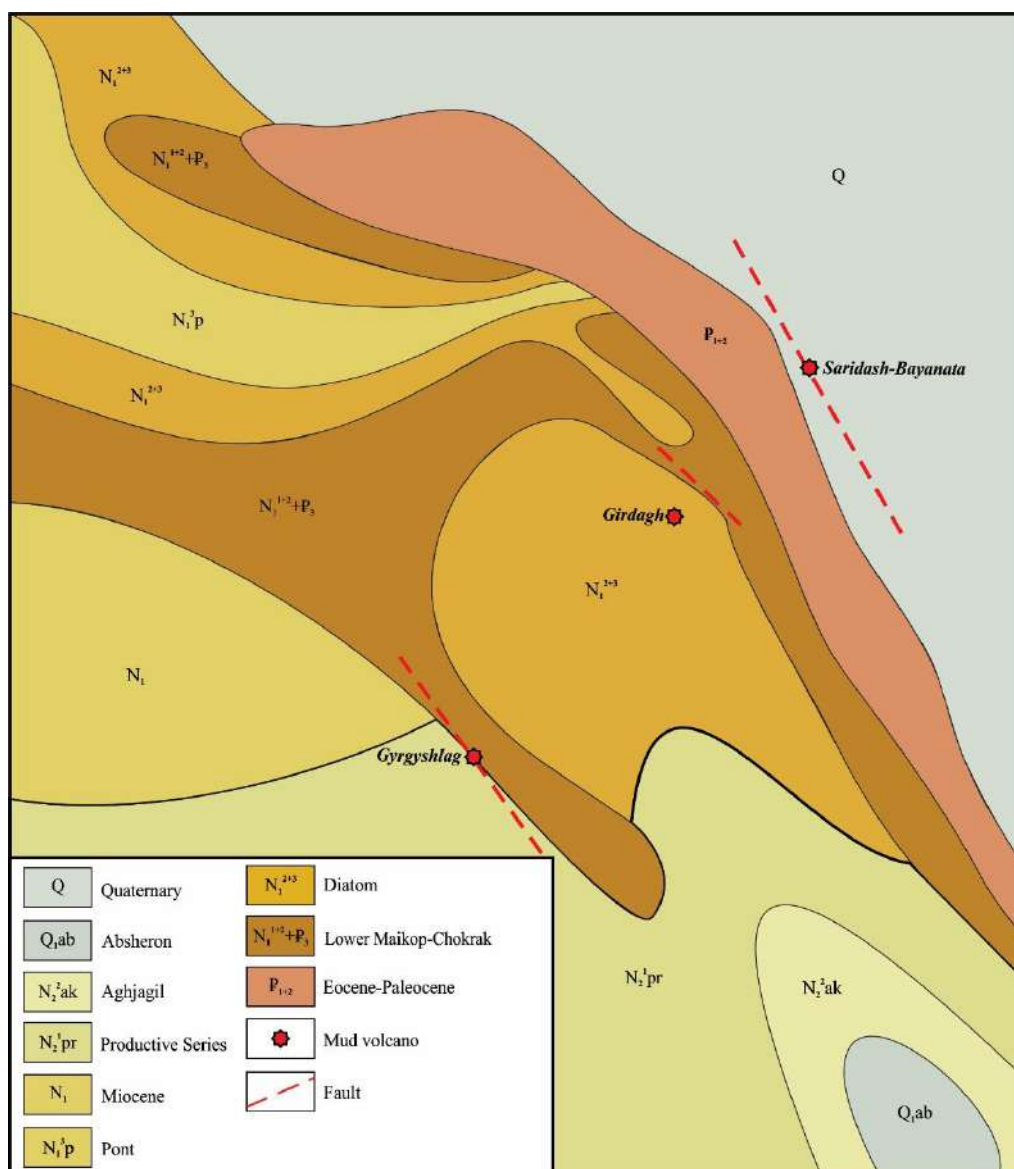


Fig. 3. Geological map of the Gyrgyshlag-Girdagh areas (after [31])

ted in Table 2 and Fig. 6.

Major oxides. A high amount of Si is present in the chemical composition of the Chokrak samples, whereas the Cheyldere samples are noticeably different, with an average value of 80%. The mineralogical composition of the Cheyldere samples shows a lower average quartz content compared to Gyrgyshlag-Girdagh, which indicates that the higher Si content in the latter is concentrated not only in quartz but also in other silicate minerals. The amount of Al in the Chokrak samples is significantly higher in the Gyrgyshlag-Girdagh samples. The Maikop and Diatom-aged samples contain little Si but a substantial amount of Ca (average value = 11.33%). In addition, upon comparing Tables 2 and 3, the highest Ti concentration is observed in the quartz-rich, clay-deficient Chokrak samples. Despite the absence of detectable Ti-bearing minerals like rutile or titanite, and considering hematite is a minor component, the elevated Ti is likely attributed to its incorporation within

undetected trace minerals or, potentially, adsorption onto the abundant quartz surfaces. Quartz, while not a typical host for Ti, can adsorb trace elements, particularly if it exhibits surface alterations or microfractures [e.g., 20]. Conversely, some clay-rich samples exhibit lower Ti concentrations, potentially due to the dilution effect of clay minerals and variations in Ti partitioning during sedimentation [e.g., 32]. The variations observed between the stratigraphic units in terms of Si, Al, Ca, Fe, Ti, and other chemical compositions result from different genesis conditions.

Provenance. In the geochemical classification diagram (Fig. 7), the samples correspond to different types of terrigenous quartz, indicating distinct provenance sources or depositional environments. The predominance of Fe and Mg in the Maikop and Diatom samples indicates a close association with greywackes and litharenite. However, two Diatom samples are positioned within the arkosic region of the classification diagram due to their low Na/K concen-

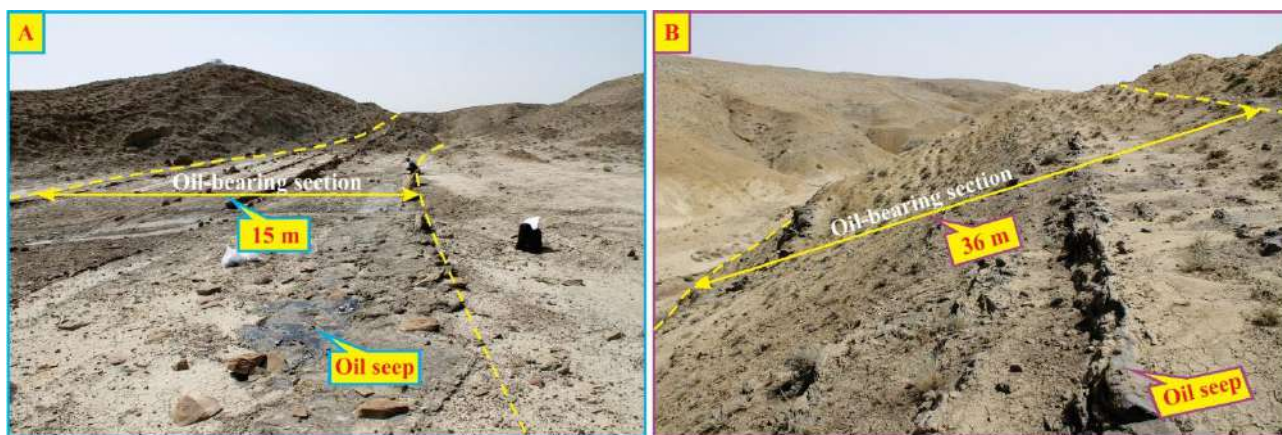


Fig. 4. Oil seeps in the Maikop (A) and Chokrak (B) oil-bearing sections in the Cheyildere area

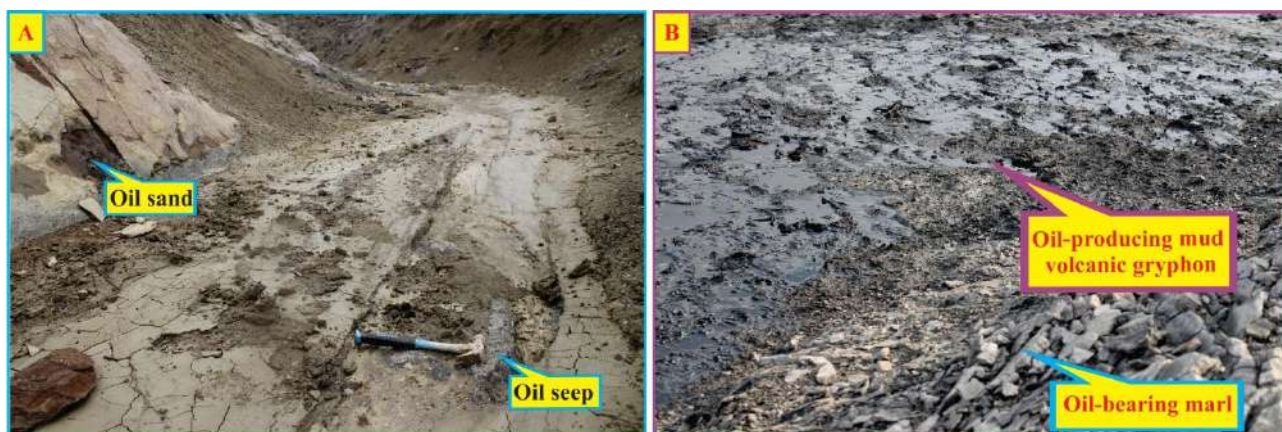


Fig. 5. Oil-bearing outcrops of Chokrak (A) and Meotian (B) formations in the Gyrgyshlag-Girdagh areas

Table 1

Description of some of the analyzed samples

Area	Sample	Age	Description
Cheyildere	Ch-1	Chokrak	Sandstone that erodes relatively quickly and smells of oil
	Ch-9	Chokrak	Fine-grained sand with a slight smell of oil
	Ch-18	Upper Maikop	Sandy rock mixed with clay, with a strong smell of oil
	Ch-20	Upper Maikop	Sandy carbonate rock saturated with oil
Gyrgyshlag-Girdagh	GG-25	Chokrak	Oil-saturated relatively hard sandstone
	GG-31	Chokrak	Rapidly eroding sandstone with a faint smell of oil
	GG-36	Diatom	Dolomite rock with excess oil in the intermediate layers

trations [8]. Most of the Chokrak samples show dual localization due to their Si and Na/K ratios. From this perspective, the Gyrgyshlag-Girdagh samples are classified as subarkoses, while the majority of the Cheyildere samples are categorized as sublitharenites.

The discriminant function diagram in Fig. 8 indicates that the Chokrak samples are predominantly influenced by sediments derived from quartzose sources. However, the possibility of contributions from both intermediate and felsic magmatic sources, in addition to quartzose sedimentary sources, to the formation of Miocene oil-bearing samples cannot be excluded [8].

Geochemical analyses of the Chokrak samples revealed a higher concentration of potassium K

compared to sodium Na, with these samples primarily composed of subarkosic and sublitharenitic quartz (see Fig. 7). The Chokrak samples, which exhibit a more mature mineralogical nature with a higher quartz content, are linked to passive continental margins. These deposits are typically associated with the interior parts of cratons or recycled areas of orogens, reflecting long-distance sediment transport [19]. Additionally, these deposits, potentially linked to intense weathering, polycyclic sand fractions, and also granite-gneiss terranes, may have originated from pre-existing sedimentary terranes. The paleoclimatic conditions of these deposits suggest a humid climate during their formation.

Oil Richness. Along with moisture, the bitumen

Table 2

The results of a mineralogical analysis of samples

Area (age)	Sample	Quartz	Feldspar	Calcite	Dolomite	Mont- moril-	Kaolinite	Illit	Pyrite	Hematite	Diopside	Gypsum	Halite	Anhydrite
Cheyildere (Chokrak)	Ch-1	75	12	-	-	-	-	-	2	1	-	-	-	-
	Ch-2	75	13	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-
	Ch-3	69	14	-	-	3	2	-	-	2	-	-	-	-
	Ch-4	49	12	-	-	9	5	6	-	2	5	-	-	1
	Ch-5	75	12	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	4
	Ch-6	74	6	-	-	6	-	3	-	2	-	-	-	-
	Ch-7	55	12	-	-	12	-	8	-	4	-	-	-	2
	Ch-8	75	6	-	-	6	-	3	-	1	-	-	-	-
	Ch-9	69	14	-	-	4	-	2	-	1	-	-	3	-
	Ch-10	72	7	-	-	7	-	3	-	1	-	-	-	1
	Ch-11	75	6	-	-	6	-	3	-	1	-	-	-	-
	Ch-12	73	6	-	-	6	-	3	-	2	-	-	-	1
	Ch-13	74	6	-	-	6	-	3	-	2	-	-	-	1
	Ch-14	72	7	-	-	6	-	3	-	2	-	-	-	1
	Ch-15	81	3	-	-	5	-	2	-	-	-	-	1	1
<i>Average value</i>		<i>70.9</i>	<i>9.1</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>	<i>5.1</i>	<i>0.5</i>	<i>2.6</i>	<i>0.1</i>	<i>1.5</i>	<i>0.3</i>	<i>0.0</i>	<i>0.3</i>	<i>0.8</i>
Cheyildere (Upper Maikop)	Ch-16	12	10	55	-	5	5	-	-	3	-	-	-	-
	Ch-17	44	15	-	-	10	8	8	-	3	5	-	-	3
	Ch-18	34	12	-	-	12	5	-	-	3	-	-	-	2
	Ch-19	27	13	-	-	12	5	-	1	2	-	-	-	1
	Ch-20	31	10	35	-	3	5	-	-	4	-	-	-	-
	Ch-21	48	14	20	-	4	-	-	-	2	-	-	-	-
<i>Average value</i>		<i>32.7</i>	<i>12.3</i>	<i>18.3</i>	<i>0.0</i>	<i>7.7</i>	<i>4.7</i>	<i>1.3</i>	<i>0.2</i>	<i>2.8</i>	<i>0.8</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>	<i>1.0</i>
Gyrgyshlag-Girdagh (Chokrak)	GG-22	74	4	-	-	-	-	4	-	4	3	4	-	4
	GG-23	75	10	-	-	-	-	3	-	2	3	-	-	4
	GG-24	74	7	-	-	3	-	3	-	2	2	-	-	6
	GG-25	73	8	-	-	3	-	3	-	1	2	2	-	5
	GG-26	68	10	-	-	3	-	3	-	3	2	3	-	5
	GG-27	74	9	-	-	5	-	3	-	-	2	-	-	4
	GG-28	73	8	-	-	3	3	3	-	1	3	-	-	3
	GG-29	54	14	-	-	3	3	4	-	3	2	2	-	10
	GG-30	72	9	-	-	5	-	3	-	1	2	-	-	5
	GG-31	73	8	-	-	5	-	3	-	2	3	-	-	3
	GG-32	74	7	-	-	5	-	3	-	2	3	-	-	3
<i>Average value</i>		<i>72.1</i>	<i>8.3</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>	<i>3.2</i>	<i>0.5</i>	<i>3.2</i>	<i>0.0</i>	<i>1.8</i>	<i>2.4</i>	<i>0.9</i>	<i>0.0</i>	<i>4.3</i>

Gyrgyshlag-Girdagh (Diatom)	GG-33	81	5	-	-	3	-	3	-	1	2	-	-	-
	GG-34	71	10	-	-	4	3	3	-	1	-	-	-	-
	GG-35	69	10	-	-	4	3	3	-	2	3	-	-	-
	GG-36	7	3	-	69	4	3	3	-	2	3	-	-	-
	GG-37	6	4	3	71	-	-	-	-	3	-	-	-	-
	GG-38	37	10	-	-	20	5	5	-	4	3	8	-	-
	GG-39	20	10	5	5	10	6	5	-	4	-	22	-	-
	GG-40	39	15	-	-	10	5	5	-	3	5	9	-	-
	GG-41	27	10	-	-	20	12	12	-	4	5	1	-	-
	GG-42	38	15	3	16	6	-	5	-	5	-	3	-	-
	GG-43	43	18	-	8	10	5	5	-	3	-	-	-	-
	GG-44	39	15	20	3	5	3	3	-	2	3	-	-	-
	GG-45	26	7	-	-	25	10	15	-	5	3	1	-	-
Average value		35.2	10.6	2.6	14.3	9.8	4.6	5.3	0.0	3.2	2.1	3.7	0.0	0.0

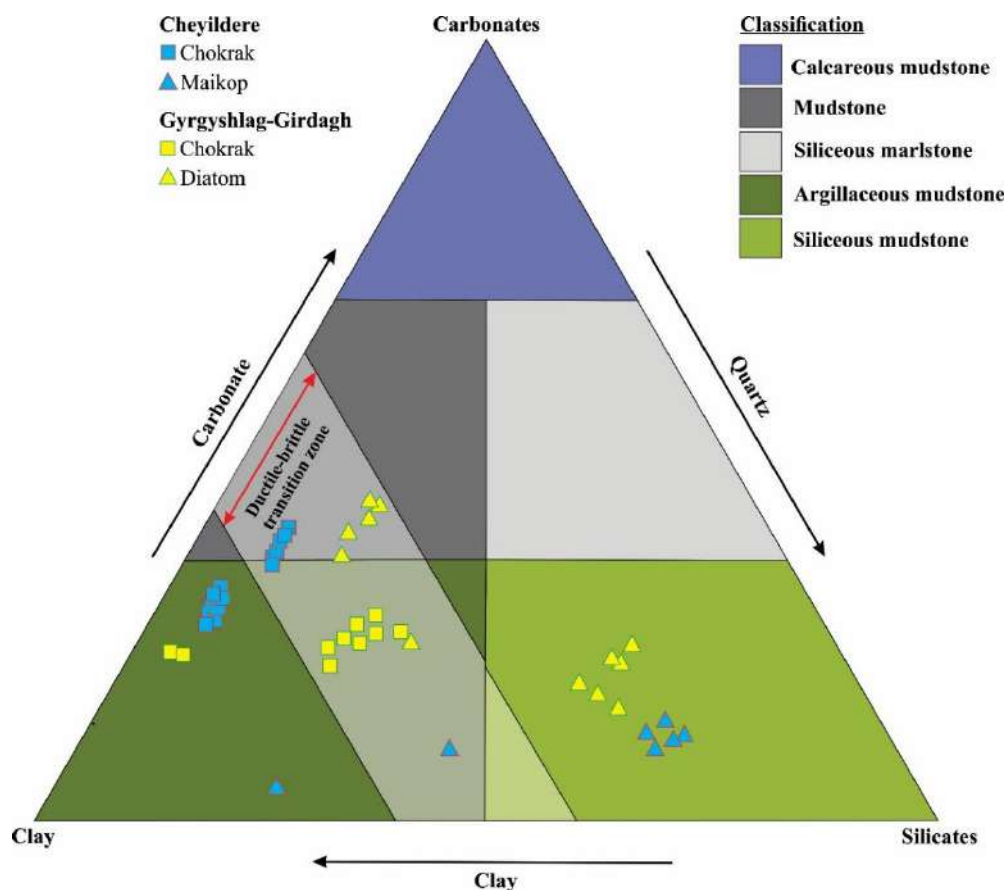


Fig. 6. Mineralogical classification diagram of samples (after [4])

content in the Chokrak samples (averaging 7.63% for Chiyldere and 6.4% for Gyrgyshlag-Girdagh) is nearly half of that found in the Maikop samples (with an average of 14.78% for Childere) and Diatom samples (averaging 14.7% for Gyrgyshlag-Girdagh). The results suggest that samples with relatively high moisture content, along with clay and carbonate

minerals, demonstrate a higher oil storage potential compared to those with higher quartz content. In particular, Diatom marls stand out in this context (Table 4), as they exhibit favorable characteristics for hydrocarbon accumulation.

Conclusions. The Chokrak oil-bearing rocks stand out due to the total thickness of the oil-bearing

Table 3

The chemical composition of the samples, %

Area (age)	Sam-ple	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃
Cheyildere (Chokrak)	Ch-1	0.68	0.76	4.36	82.06	0.09	2.93	1.45	0.83	0.81	0.04	2.25
	Ch-2	0.58	0.59	4.72	83.16	0.08	0.28	1.65	1.71	0.72	0.02	1.91
	Ch-3	0.55	0.62	5.08	82.4	0.10	0.43	1.86	1.50	0.45	0.02	2.32
	Ch-4	1.98	1.01	9.04	71.65	0.11	0.67	2.71	1.13	0.98	0.03	2.97
	Ch-5	0.41	0.36	4.50	82.69	0.16	2.77	1.61	1.54	0.71	0.01	1.65
	Ch-6	0.49	0.48	4.35	85.66	0.01	0.35	1.45	0.55	0.52	0.02	2.57
	Ch-7	0.54	1.04	9.88	71.15	0.01	1.32	2.84	1.92	0.88	0.04	4.19
	Ch-8	0.55	0.44	4.45	84.91	0.08	0.44	1.68	0.46	0.43	0.01	1.82
	Ch-9	3.39	0.43	5.05	82.06	0.03	0.38	1.73	0.25	0.50	0.07	1.67
	Ch-10	1.51	0.48	5.06	83.82	0.01	0.58	1.80	0.41	0.45	0.01	1.87
	Ch-11	0.65	0.43	4.94	85.96	0.01	0.25	1.72	0.33	0.47	0.01	1.72
	Ch-12	0.55	0.43	4.97	85.24	0.06	0.56	1.69	0.34	0.59	0.02	2.18
	Ch-13	0.39	0.39	4.55	82.27	0.08	2.07	1.27	1.02	0.71	0.01	2.11
	Ch-14	1.62	0.58	5.68	80.42	0.06	0.57	2.04	0.59	0.58	0.02	2.04
	Ch-15	0.32	0.19	1.73	91.86	0.01	0.60	0.52	0.29	0.36	0.01	0.81
Average value		0.95	0.55	5.22	82.35	0.06	0.95	1.73	0.86	0.61	0.02	2.14
Cheyildere (Upper Maikop)	Ch-16	0.86	2.39	7.10	28.18	0.18	0.15	1.34	28.54	0.42	0.15	3.79
	Ch-17	1.24	0.90	12.77	70.83	0.29	2.50	2.92	1.34	0.63	0.02	3.23
	Ch-18	1.31	1.40	8.85	49.84	0.13	0.88	1.60	2.29	0.45	0.07	3.76
	Ch-19	1.37	1.07	9.99	43.79	0.14	1.90	1.73	1.38	0.50	0.04	3.01
	Ch-20	0.73	1.03	5.95	39.93	0.19	0.37	1.69	21.45	0.53	0.07	4.89
	Ch-21	1.09	1.27	6.31	59.47	0.18	0.38	1.64	12.99	0.26	0.03	2.30
Average value		1.10	1.34	8.50	48.67	0.19	1.03	1.82	11.33	0.47	0.06	3.50
Gyrgyzlag-Girdagh (Chokrak)	GG-22	0.91	0.61	4.38	74.29	0.007	3.54	1.46	0.94	0.46	0.006	4.19
	GG-23	1.27	0.90	6.51	80.42	0.006	0.01	1.82	0.94	0.74	0.007	2.20
	GG-24	0.85	0.01	5.53	79.55	0.009	0.01	1.75	0.76	0.62	0.006	2.21
	GG-25	0.97	0.57	5.95	79.47	0.009	1.03	1.83	0.37	0.01	0.009	1.74
	GG-26	1.74	1.30	6.56	71.11	0.008	1.61	1.78	1.21	0.36	0.009	2.89
	GG-27	1.01	0.70	6.07	81.03	0.007	0.43	1.47	0.48	0.51	0.007	2.33
	GG-28	1.06	0.01	4.33	87.36	0.005	0.01	1.24	0.01	0.01	0.006	1.74
	GG-29	1.39	1.06	8.43	69.68	0.004	1.14	1.97	1.02	0.54	0.003	3.12
	GG-30	1.04	0.75	6.09	80.43	0.008	0.41	1.52	0.62	0.47	0.010	1.68
	GG-31	1.51	0.81	6.01	82.32	0.007	0.01	1.67	0.78	0.29	0.008	1.99
	GG-32	1.63	0.77	5.77	82.75	0.009	0.01	1.52	0.49	0.29	0.009	2.02
Average value		1.22	0.68	5.97	78.95	0.01	0.75	1.64	0.69	0.39	0.01	2.37
Gyrgyzlag-Girdagh (Diatom)	GG-33	1.38	0.67	4.11	86.2	0.009	0.01	1.54	1.57	0.01	0.008	1.40
	GG-34	1.18	0.01	5.72	81.22	0.003	1.28	1.85	0.72	0.01	0.005	1.57
	GG-35	0.01	1.07	6.19	82.57	0.004	0.98	1.41	0.75	0.53	0.004	2.06
	GG-36	0.02	17.79	2.89	10.24	0.006	0.01	0.36	29.07	0.01	0.56	2.87
	GG-37	0.01	16.04	3.26	10.92	0.005	0.01	0.40	27.94	0.01	0.33	3.86
	GG-38	1.93	2.65	14.97	55.22	0.007	4.84	2.69	2.49	0.43	0.008	5.06
	GG-39	2.08	1.98	9.99	38.96	0.009	11.08	1.94	13.79	0.01	0.006	4.49
	GG-40	2.49	1.69	12.52	59.18	0.006	5.53	2.43	3.42	0.01	0.010	3.91
	GG-41	1.96	3.34	15.56	57.34	0.008	0.67	3.53	1.08	0.75	0.006	5.35
	GG-42	1.60	4.02	9.43	49.95	0.007	2.34	2.03	10.32	0.42	0.009	5.27
	GG-43	1.62	2.53	10.24	59.18	0.008	0.73	2.34	9.54	0.52	0.009	3.69
	GG-44	1.95	1.55	7.81	53.53	0.009	0.01	1.96	15.48	0.01	0.010	2.07
	GG-45	3.08	3.16	15.84	55.26	0.010	0.84	3.57	1.10	0.51	0.008	5.70
Average value		1.49	4.35	9.12	53.83	0.01	2.18	2.00	9.02	0.25	0.07	3.64

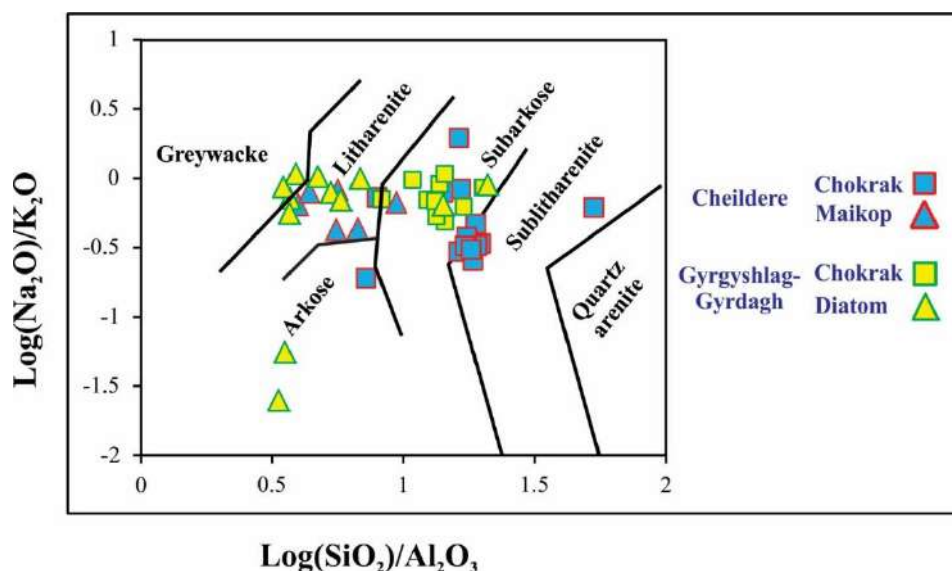


Fig. 7. Diagrams showing the chemical classification [23]

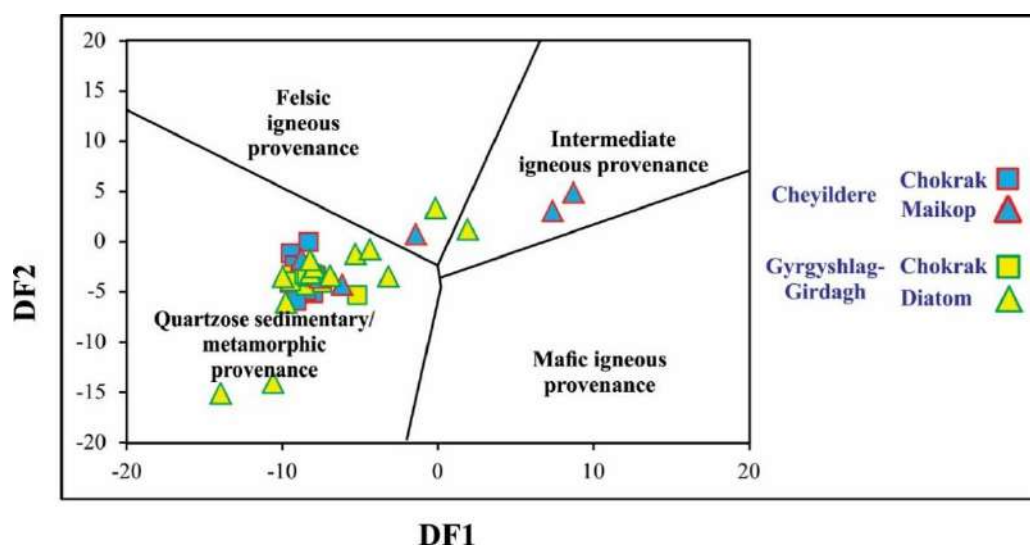


Fig. 8. Classification plot of discriminant functions DF1 and DF2 for the studied samples. Provenance fields are from [29]

Table 4

Concentration of moisture and oil content in oil-bearing rock samples

Area/Age	Sample	Moisture, %	Oil content, %
Cheyildere (Chokrak)	Ch-1	0.54	6.29
	Ch-2	0.38	5.15
	Ch-3	0.79	20.04
	Ch-4	1.35	5.64
	Ch-5	0.41	8.66
	Ch-6	0.42	8.18
	Ch-7	1.07	13.71
	Ch-8	0.33	4.81
	Ch-9	0.59	5.02

Continuation of table 4

Cheyildere (Chokrak)	Ch-10	0.52	6.44
	Ch-11	0.27	6.28
	Ch-12	0.38	5.46
	Ch-13	0.99	4.76
	Ch-14	0.34	4.7
	Ch-15	0.33	9.27
Average		0.58	7.63
Cheyildere (Upper Maikop)	Ch-16	1.16	2.77
	Ch-17	0.87	14.56
	Ch-18	1.64	20.62
	Ch-19	1.94	24.27
	Ch-20	0.52	13.26
	Ch-21	1.04	13.21
Average		1.19	14.78
Gyrgyshlag-Girdagh (Chokrak)	GG-22	0.33	5.2
	GG-23	0.43	5.16
	GG-24	0.36	8.73
	GG-25	0.42	9.5
	GG-26	0.86	6.08
	GG-27	0.71	5.03
	GG-28	0.47	6.6
	GG-29	0.83	14.48
	GG-30	0.45	6.54
	GG-31	0.72	3.96
	GG-32	0.71	3.99
Average		0.57	6.84
Gyrgyshlag-Girdagh (Diatom)	GG-33	9.79	2.95
	GG-34	0.52	11.33
	GG-35	2.57	34.22
	GG-36	0.98	22.67
	GG-37	1.34	25.71
	GG-38	5.73	10.46
	GG-39	4.21	18.31
	GG-40	1.86	9.68
	GG-41	4.29	13.12
	GG-42	1	18.5
	GG-43	2.17	13.31
	GG-44	0.45	6.98
	GG-45	4.27	6.17
Average		3.01	14.87

section, which reaches up to 40 meters in the Miocene outcrops observed in the Cheyildere and Gyrgyshlag-Girdagh areas. When comparing the areas, Chokrak is particularly notable for its high quartz content, which exceeds 70%. The oil-bearing rocks in this formation are characterized by a relatively low clay mineral content and a complete absence of carbonate minerals. In contrast, the Upper Maikop oil-bearing formation contains calcite, while the Diatom oil-bearing formation is rich in dolomite. The Diatom formation also exhibits a significant increase in clay mineral content, with an average of 19.75%.

Most oil-bearing rocks of Maikop and Diatom ages are associated with greywacke and litharenite, while the Chokrak formation, with its higher silicon content, is linked to subarkosic and sublitharenitic rocks. For the oil-bearing Miocene rocks, in addition to quartzose-rich sedimentary sources, certain intermediate and felsic igneous rocks should also be

considered as potential contributors. The Chokrak oil-bearing formation, which is rich in quartz, exhibits a more mature mineralogical composition. Such deposits, typically associated with passive continental margins, the interior regions of cratons, or recycled orogenic areas, are characteristic of long-distance transport. Such deposits, which undergo relatively intensive weathering and are associated with granite-gneiss terranes and a polycyclic sand fraction, may have originated from previously existing sedimentary terranes.

Compared to the Upper Maikop and Diatom samples, the Chokrak samples contain half the oil concentration and moisture. Samples with higher clay and carbonate content show significantly greater oil accumulation potential than those with high quartz content. In this regard, the marly rocks of the Diatom (Meotian) are particularly noteworthy.

References

1. Abbasov, O.R. (2017). *Distribution regularities and geochemistry of oil shales in Azerbaijan*. Mineral resources of Ukraine, 2, 22-30.
2. Abbasov, Orhan, Aliyev, Adil. (2018). *Organic geochemical characteristics of oil shale in Azerbaijan*. The 36th National and the 3rd International Geosciences Congress, Tehran, Iran, 25-27 February. 12.
3. Abbasov, O.R. (2022). *Eocene-Miocene oil shales in Azerbaijan: Stratigraphic controls on formation, distribution and hydrocarbon generation*. Stratigraphy and sedimentology of oil-gas basins, 1, 39-55. <https://doi.org/10.35714/ggis-trat20220100004>
4. Abbasov, Orhan R., Baloglanov, Elnur E., Yolchuyeva, Ulviyya J., Khuduzade, Arastun I., Akhundov, Ruslan V. (2025). *Factors controlling the formation and oil generating potential of the middle Eocene shales of Eastern Azerbaijan*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 77(1), A020724. <http://doi.org/10.18268/BSGM2025v77n1a020724>
5. Aliyev Ad.A., Guliyev, I.S., Dadashev, F.G., Rahmanov, R.R. (2015). *Atlas of mud volcanoes in the world*. Baku: Publishing house "Nafta-Press", "Sandro Teti Editore", 321.
6. Aliyev, Ad.A., Abbasov, O.R., Ibadzade, A.J., Mammadova, A.N. (2018). *Genesis and organic geochemical characteristics of oil shale in Eastern Azerbaijan*. SOCAR Proceedings, 3, 4-15. <http://doi.org/10.5510/OGP20180300356>
7. Aliyev, A., Abbasov, O., Agayev, A. (2019). *Mineralogy and geochemistry of oil shale in Azerbaijan: Classification, palaeoweathering and maturity features*. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology, 50, 11-26. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2019-50-01>
8. Aliyev, Adil A., Abbasov, Orhan R. (2019). *Nature of the provenance and tectonic setting of oil shale (Middle Eocene) in the Greater Caucasus southeastern plunge*. Geodynamics, 1(26), 43-59. <https://doi.org/10.23939/jgd2019.01.043>
9. Aliyev, A.A., Abbasov, O.R. (2019). *Mineralogical and geochemical proxies for the Middle Eocene oil shales from the foothills of the Greater Caucasus, Azerbaijan: Implications for depositional environments and paleoclimate*. Mineralia Slovaca, 51(2), 157-174.
10. Aliyev, A.A., Abbasov, O.R. (2020). *Distribution patterns, organic geochemistry and mineralogy of oil shales in Azerbaijan*. Gornyi Zhurnal, 8, 13-18. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.08.02>
11. Aliyev, Ad.A., Abbasov, O.R., Aghayev, A.M., Khuduzade, A.I., Hasanov, E.H. (2022). *Mineralogy, geochemistry and paleoweathering characteristics of Paleogene-Miocene oil shales in Azerbaijan*. SOCAR Proceedings, 1, 24-36. <https://doi.org/10.5510/OGP20220100625>
12. Aliyev, A., Huseynov, D., Abbasov, O., Rashidov, T., Kangarli, I. (2024). *Mud volcanoes of Azerbaijan: The unique natural objects of the geoheritage*. Geoheritage, 16, 20. <https://doi.org/10.1007/s12371-024-00931-3>
13. Alizade, A.A., Guliyev, I.S., Mamedov, P.Z., Aliyeva, E.H., Feyzullayev, A.A., Huseynov, D.A. (2018). *Productive strata of Azerbaijan*, 1. M., Nedra. I, 305.
14. Alizade, A.A., Guliyev, I.S., Mamedov, P.Z., Aliyeva, E.H., Feyzullayev, A.A., Huseynov, D.A. (2018). *Productive strata of Azerbaijan*, 2. M., Nedra. II, 236.
15. Baldermann, Andre, Abbasov, Orhan Rafael, Bayramova, Aygun, Abdullayev, Elshan, Dietzel, Martin (2020). *New insights into fluid-rock interaction mechanisms at mud volcanoes: Implications for fluid origin and mud provenance at Bahar and Zenbil (Azerbaijan)*. Chemical Geology, 537, 119479. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119479>
16. Baloglanov, E.E., Abbasov, O.R., Akhundov, R.V. (2018). *Mud volcanoes of the world: classifications, activities and environmental hazard (informational-analytical review)*. European Journal Natural History, 5, 12-26.
17. Baloglanov, E. (2023). *Geochemical proxies of the gryphon breccia of mud volcanoes in East Azerbaijan: regularities in the distribution of chemical elements and spatial characteristics of sedimentation*. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv

- National University, Series "Geology. Geography. Ecology", (59), 8-17. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-01>
18. Bayramova, Aygun, Abbasov, Orhan R., Aliyev, Adil A., Baloglanov, Elnur E., Stamm, Franziska M., Dietzel, Martin, Baldermann, Andre. (2023). Tracing water-rock-gas reactions in shallow productive mud chambers of active mud volcanoes in the Caspian Sea region (Azerbaijan). *Minerals*, 13(5), 696. <https://doi.org/10.3390/min13050696>
 19. Cox, R., Lowe, D.R., Cullers, R.L. (1995). The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of Mudrock chemistry in the Southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(14). 2919–2940. [http://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00185-9](http://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00185-9)
 20. Deer, W.A., Howie, R.A., Zussman, J. (1992). *An introduction to the rock-forming minerals*. Longman Scientific & Technical, 696.
 21. Guliyev, I.S., Abdullayev, N.R., Huseynova, Sh.M. (2020). Distribution and volume of rocks in sedimentary basins – unusual case of the South Caspian basin. *SOCAR Proceedings*, 3, 4–10. <https://doi.org/10.5510/OGP20200300439>
 22. Gurbanov, V.Sh., Narimanov, N.R., Nasibova, G.J., Mukhtarova, Kh.Z., Narimanov, R.N., Huseynova, Sh.M. (2021). Qualitative assessment of compressional stresses within the South Caspian megadepression and their impact upon structure formation and hydrocarbon generation. *ANAS Transactions, Earth Sciences*, 2, 39–49. <https://doi.org/10.33677/ggianas20210200061>
 23. Herron, M.M. (1988). Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *Journal of Sedimentary Research*, 58(5), 820–829. <http://doi.org/10.1306/212f8e77-2b24-11d7-8648000102c1865d>
 24. Liu, Jiarui., Treude, Tina, Abbasov, Orhan R., Baloglanov, Elnur E., Aliyev, Adil A., Harris, Carolyn M., Leavitt, William D., Young, Edward D. (2024). Clumped isotope evidence for microbial alteration of thermogenic methane in terrestrial mud volcanoes. *Geology*, 52 (1), 22–26. <https://doi.org/10.1130/G51667.1>
 25. Muradova, P.A., Litvishkov, Yu.N., Abbasov, O.R. (2024). Thermogravimetric study of oil shales of some deposits in Eastern Azerbaijan by the method of microwave impact. *ANAS Transactions, Earth Sciences*, 2, 160–167. <https://doi.org/10.33677/ggianas20240200134>
 26. Nadirov, S.G., Salayev, S.G., Zeynalov, M.M. (1959). Geological prerequisites for open-pit mining of oil-bearing rocks of the Oligocene-Miocene complex of the Kobystan region. *Izv. Academy of Sciences of the AzSSR. Ser. geol.-geogr. sciences*. 1959, 5.
 27. Odonne, Francis, Imbert, Patrice Imbert, Dupuis, Matthieu, Aliyev, Adil A., Abbasov, Orhan R., Baloglanov, Elnur E., Vendeville, Bruno C., Gabalda, Germinal, Remy, Dominique, Bichaud, Victori, Juste, Rémy, Pain, Maëlys, Blouin, Arthur, Dofal, Anthony, Gertauda, Mathieu. (2020). Mud volcano growth by radial expansion: Examples from onshore Azerbaijan. *Marine and Petroleum Geology*, 112, 104051. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.104051>
 28. Odonne, Francis, Imbert, Patrice Imbert, Remy, Dominique, Gabalda, Germinal, Aliyev, Adil A., Abbasov, Orhan R., Baloglanov, Elnur E., Bichaud, Victori, Juste, Remy, Dupuis, Matthieu, Bonvalot, Sylvain. (2021). Surface structure, activity and microgravimetry modeling delineate contrasted mud chamber types below flat and conical mud volcanoes from Azerbaijan. *Marine and Petroleum Geology*, 34, 105315. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.105315>
 29. Roser, B.P., Korsch, R.J. (1988). Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. *Chemical Geology*, 67 (1-2), 119–139. [http://doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90010-1](http://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90010-1)
 30. Salayev, S.G., Kravchinskiy, Z.Ya., Selimkhanov, A.I., Nadirov, S.G., Sadikov, A.M., Aliyev, H.M. (1989). *Oil sands and oil shale of Azerbaijan*. Baku: Elm, 1989. 209.
 31. Yagubov, A.A., Ali-zade, A.A., Zeynalov, M.M. (1971). *Mud volcanoes of Azerbaijan*. Atlas. Baku: Elm, 256.
 32. Wedepohl, K.H. (1978). *Handbook of geochemistry*. Springer-Verlag, 442.

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Мінералогічні та геохімічні показники міоценових відкладень Східного Азербайджану: походження та нафтоносність

Ельнур Балогланов¹

наук. співробітник відділу грязьового вулканізму,¹ Інститут геології та геофізики,
Міністерство науки та освіти Азербайджанської Республіки, Баку, Азербайджан;

Ульвія Йолчуєва^{2,3}

к. хім. н., доцент, зав. лабораторії,² Інститут нафтохімічних процесів
Міністерства науки та освіти Азербайджанської Республіки, Баку, Азербайджан;

Кафедра хімічної інженерії, факультет інженерії та прикладних наук,

³ Університет Хазар, Баку, Азербайджан;

Руслан Ахундов¹

наук. співробітник відділу грязьового вулканізму,

Ельмар Самедов¹

інженер відділу грязьового вулканізму;

Камал Мустафаєв⁴

менеджер,⁴ центр досліджень та розробок AZLAB, Баку, Азербайджан

Це дослідження показує потенціал нетрадиційних вуглеводневих ресурсів у Східному Азербайджані, зосереджуючись на нафтоносних породах у районах Чейилдере та Гиргишлаг-Гірдаг. У дослідженні оцінюється просторовий та часовий розподіл мінералів та хімічного складу в міоценових стратиграфічних формаціях. Мінералогічні та хімічні дані дозволили ідентифікувати теригенні типи кварцу в Майкопській, Чокракській та Діатомових формаціях, що надає інформацію про їх седиментологічну зрілість. Крім того, у дослідженні використовуються результати геохімічної класифікації та діаграми тектонічних дискримінантних функцій для глибшого розуміння протолітів міоценових нафтоносних відкладень. Це дослідження також оцінює вплив мінералогічного складу та вологи на потенціал нафтоносності. Ці результати надають цінну інформацію для оцінки нафтоносного потенціалу міоценових відкладень у регіоні, що може суттєво вплинути на майбутні стратегії розвідки та управління ресурсами. Геологічні характеристики нафтоносних відкладень стратиграфічної одиниці міоцену були ретельно проаналізовані, що дало нове розуміння закономірностей розподілу нафтоносних формацій та пластів у досліджуваних районах. Мінералогічний склад було детально досліджено, зосереджуючись на просторових та часових варіаціях розподілу мінералів у різних формаціях міоцену. Хімічний склад виявляє значні відмінності між формаціями з точки зору елементних сигнатур. Вивчення хімічних показників дозволило ідентифікувати специфічні теригенні типи кварцу. Крім того, дослідження оцінило вплив мінералогічного складу, вологості та вмісту нафти на нафтоносність. Результати продемонстрували чіткий зв'язок між мінералогічними характеристиками та нафтоносним потенціалом порід. Відносно вологості зразки, що містять глинисті та карбонатні мінерали, демонструють значно вищий потенціал накопичення нафти, ніж зразки з високим вмістом кварцу. З цієї точки зору, особливий інтерес представляють мергелісті породи Меотису.

Ключові слова: міоцен, нафтоносна порода, мінералогія, геохімія, класифікація, седиментологічна зрілість, район походження та нафтоносність.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 12 лютого 2025 р.

Прийнята 17 березня 2025 р.

Тектонічна еволюція внутрішньоплитних структур Сарматії у фанерозої. 2. Тектонічні каркаси деформацій

Олексій Барташук¹

д. геол. н., професор кафедри фундаментальної і прикладної геології,
¹Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, Україна,
e-mail: alekseybart@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7831-6134>;

Василь Суярко¹

д. геол.-мін. н., професор, кафедра фундаментальної та прикладної геології,
e-mail: vgusuyarko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3693-4767>;

Олександр Чуєнко¹

зав. лабораторії по дослідженню порід, мінералів і викопних організмів,
e-mail: chuenko@karazin.ua, <https://orcid.org/0000-0001-6717-4695>;

Різновікові системи розломів земної кори досліджувалися як тектонічні каркаси деформацій Сарматської плити за свідченням з Дніпровсько-Донецького авлакогена. У кристалічному фундаменті та структурних поверхах осадового чохла Дніпровського грабена виділено чотири структуроутворюючих системи тектонітів: дорифейську кратонну, палеозойську рифтогенну та дві пострифтові системи ранньої (ларамійська фаза, сенон-ранній еоцен) і новітньої (аттична фаза, неоген-квартер) епох кайнозойської платформної активізації. З'ясовано, що палеозойські тектоніти склали рифтогенну решітку та каркас герцинської (заальська фаза) складчастості. Інверсійні деформації авлакогена контролюються ре-активованими дорифейськими і новоствореними кайнозойськими системами тектонітів, які незгідно накладаються на рифтові лінії. Збігання напрямів ре-активованих «реверсних» систем тектонітів з лініями шовних зон фундаменту обумовлене їх позицією уздовж мобільних кордонів мегаблоків, що об'єдналися у ядрі Сарматії як акреційні терейни. Це заперечує уявлення про формування пострифтового каркасу з прямим успадкуванням напрямів і генетичних типів палеозойських тектонітів. Реконструйовано генетичні типи «реверсних» систем тектонітів: у палеозої в умовах меридіонального розтягу і широтного стиску кори Сарматії сформувався скидо-розсувний рифтогенний каркас, натомість у кайнозої, в обстановці загально-плитного меридіонального колізійного стресу у регіональному зсувному полі напруг утворився підкидо-насувний і скидо-зсувний каркас. Визначено кінематичний механізм природного феномена просторово-часової інверсії параметрів поля напруг: геодинамічні осі у фанерозої зміщувалися у напрямку проти годинникової стрілки на $\sim 15^\circ$ за одну епоху тектогенезу із загальним переміщенням від палеозою до кайнозою на $\sim 60^\circ$. Протягом структурної еволюції у земній корі Сарматії сформувалися чотири тектонічні каркаси і плани деформацій: рифтовий (D–C₁), інверсійний синеклізний (C₂–P₁) і два колізійних платформних (T–K₁), (K₂–KZ). Встановлено закономірності розподілу у межах авлакогена новітніх зон розтягу/стиску, пов'язаних з ділянками підвищеної щільності ре-активованих тектонітів. Отримано важливий для пізнання закономірностей формування та еволюції земної кори теоретичний висновок: перебудови інфраструктури платформ відбуваються у перемінному полі напруг за деформаційними каркасами ре-активованих систем тектонітів, складених «реверсним» типом розломів змінного генетичного типу і кінематики.

Ключові слова: Дніпровсько-Донецький авлакоген; геотектонічна технологія; морфометричний і тектонофізичний аналізи; дорифейські, палеозойські, кайнозойські системи тектонітів; «реверсні» розломи; тектонічні каркаси деформацій.

Як цитувати: Барташук Олексій, Суярко Василь, Чуєнко Олександр (2025). Структурна еволюція земної кори Східноєвропейської платформи: свідчення із Сарматської плити. 2. Тектонічні каркаси деформацій. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (62), 25-49. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-02>

Incites: Bartaschuk Oleksii, Suyarko Vasyl, Chuienko Oleksandr (2025). Tectonic Evolution of the Intra-plate Structures of Sarmatia in the Phanerozoic. 2. Tectonic frameworks of deformations. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (62), 25-49. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-02> [in Ukrainian]

Постановка проблеми. Відомо, що розривні тектонічні структури – *тектоніти* є важливим елементом структури земної кори платформ, який визначає такі умови і особливості тектонічної та седиментаційної еволюції регіональних структур, як тектонічний стиль деформацій, характер складчастості, магматизму, сейсмічності, речовинний склад і розподіл корисних копалин в межах басейну седиментації. Деформації земної кори у процесі структурної еволюції відбиваються у її подільності за системами тектонітів на літосферні плити, терейни, мегаблоки, сегменти та менші за

розмірами тектонічні блоки, пластини і луски [1,2,5,6]. Тектоніти, порушуючи консолідовану кору шляхом механічного дроблення, обумовлюють глобальний перманентний характер структурної еволюції кори завдяки своїй рухливості і спроможності до неодноразової ре-мобілізації протягом етапів тектогенезу [3-6]. Тектоніти складаються із кількох різновікових деформаційних зон сколювання наближеної азимутальної орієнтації, тому характер їх структурного прояву визначають генетичні типи тріщин, які є складовими елементами їх інфраструктури [4,5,7-10]. За

динамічно спільними системами тектонітів на протязі епох тектоно-магматичної активізації платформ формуються каркаси деформацій земної кори, які використовують найбільше проявлені у даному регіоні регулярні напрямки планетарної решітки тріщинуватості [2-6,11]. Глобальна решітка тектонітів має усталену в геологічному часі азимутальну орієнтацію по відношенню до фігури Землі. Збіг тектонофізичних і палеомагнітних даних вказує на її формування у перемінному полі напружень і деформацій земної кори у геохронології. Тому на горизонтальному майданчику триосового тензору деформацій осі максимального стиску (σ_1) і розтягу (σ_3) завжди розташовуються відповідно до сучасних меридіанів і паралелей, натомість у полях напруг ранішніх геологічних епох вони були обернені на кути кратні 15° [3-6]. Варіації інверсій стресового поля обумовлюється глобальним ротаційним механізмом і відображаються у просторових варіаціях структури регматичної решітки. Зміни параметрів обертання планети викликають певні зміщення азимутальної орієнтації геодинамічних осей, тому зміна режимів деформацій має період, близький до геологічної епохи. Відповідно до чинного тектонічного режиму змінюється як генетичний тип, так і кінематика тектонітів, а також вергентність рухів геомас гірських порід за ними тощо [3-6,11,12].

Раніше було з'ясовано, що новітня просторова структурна диференціація земної кори Сарматії є слідством перебудов інфраструктури стародавнього кратонного ядра Східноєвропейської платформи (СЄП) протягом етапів тектоно-магматичної активізації [11,12,13]. На даний час на тлі загальної субмеридіональної орієнтації дорифейських структур фундаменту Сарматії палеозойські внутрішньо-плитні геоструктури мають північно-західне, як Дніпровсько-Донецький авлакоген (ДДА), та північно-східне простягання. Молодшим, мезозойсько-кайнозойським регіональним структурам на її південній, північно-східній та західній околицях властиве близько-широке простягання. Така різка структурна незгідність простягання фанерозойських геоструктур Сарматії з «вмороженою» анізотропією структурою її супракrustального дорифейського цоколю свідчить на користь їх деформаційної, накладеної природи [11].

Метою дослідження є з'ясування просторового і динамічного співвідношення рифтових і пострифтових систем тектонітів палеозойського і кайнозойського віку, а також дорифейських глибинних розломів, ре-активованих на етапах платформної активізації, у межах внутрішньо-плитної палеорифтової геоструктури СЄП – ДДА. Для досягнення мети вивчалися особливості структурно-

динамічного прояву - зміни генетичних типів, кінематики і вергентності рухів у різновікових *системах тектонітів*, які складають рифтові та інверсійні каркаси деформацій у дорифейському кристалічному фундаменті і структурних поверхах платформного осадового чохла. Для вирішення цих завдань використано оригінальну комплексну методику реконструкції напружено-деформованого стану земної кори і діагностики кінематичних механізмів розривних та складчастих деформацій земної кори [11].

Оригінальна методика реконструкції полів тектонічних напруг і діагностики кінематичних механізмів структурних деформацій земної кори.

Тектоніти грають визначну структуроутворюючу роль у процесі структурно-кінематичної еволюції літосфери через повсюдне поширення, рухливість і спроможність до неодноразової реактивації протягом геологічної історії [1-7,10-13]. Тому, реконструкція геодинамічних обстановок і тектонічних режимів формування і ре-активації тектонітів на етапах платформної активізації є важливою теоретичною задачею геотектоніки [3,6,11-13].

За даними польових тектонофізичних досліджень тектоніти на геологічних мікро- та мезорівнях зазвичай складаються із кількох елементарних деформаційних зон сколювання наближеної азимутальної орієнтації. За таких обставин структурний прояв тектонітів будь якого масштабу безпосередньо залежить від переважних генетичних типів тріщинуватості складових зон [1,3-6]. Тому в основу тектонофізичних методів реконструкції головних параметрів полів палеонапруг покладено структурно-кінематичний і парагенетичний аналізи тектонітів [4,6,14].

Нами було створено оригінальну методику реконструкції напружено-деформованого стану земної кори на підставі комплексного аналізу розривних і складчастих деформацій [11]. На практиці ця методика передбачає проведення геотектонічних досліджень у декілька етапів, послідовність виконання яких ілюстровано нижче за даними з ДДА. На першому етапі складається аналітична електронна база тектонітів, виявлених бурінням і сейсморозвідкою у складчастому фундаменті і структурних поверхах платформного чохла. У якості вихідних картографічних даних для геоінформаційних технологій використовуються карти структурних поверхів (рис. 1), геофізичних полів, неотектонічних рухів, орогідрографії, схеми морфометричного та аерокосмогеологічного дешифрування геологічних об'єктів у денному рельєфі. Зважаючи на переважну криволінійну конфігурацію тектонітів у плані до них застосовується технологія фрагментації дугоподіб-

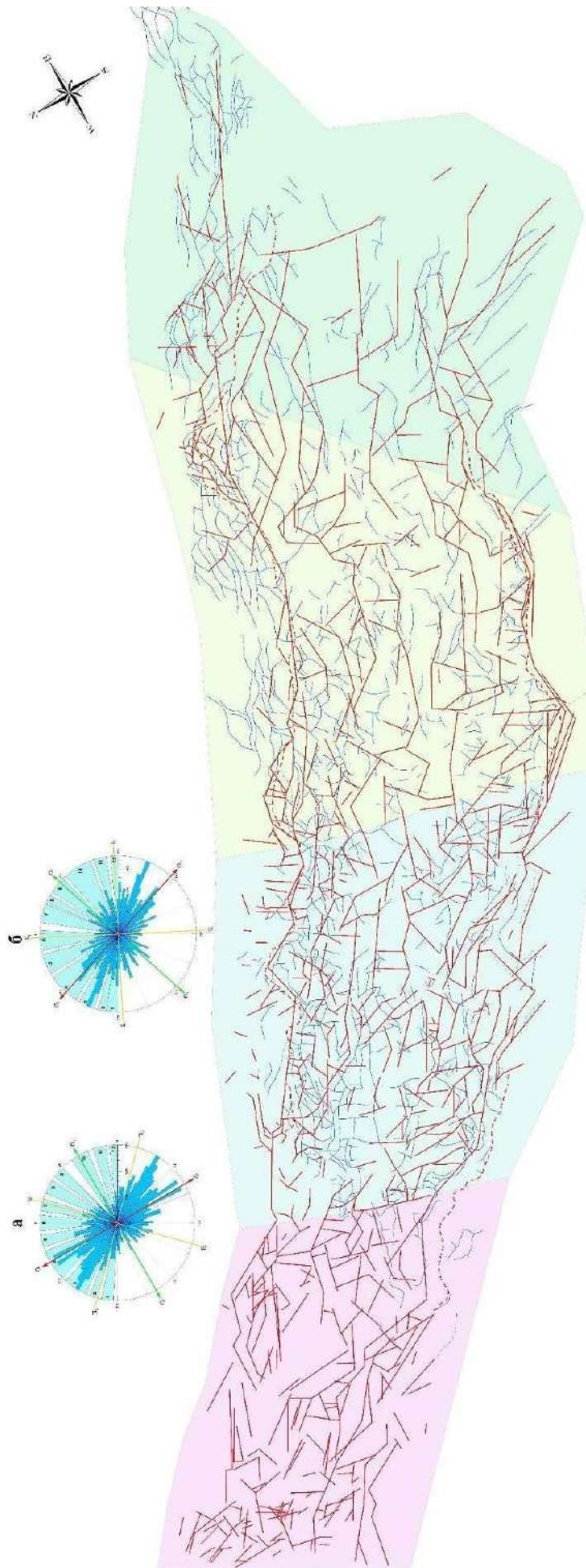


Рис. 1. Порівняльна тектонічна схема рифтогенних систем тектонітів дорифейського фундаменту (червоний) та верхньовізейського комплексу осадового чохла (блакитний) Дніпровсько-Донецького авлакогена /
 Fig. 1. Comparative tectonic scheme of tectonites riftogenic systems of the pre-Rifean basement (red) and the Upper Visean complex of the sedimentary cover (blue) of the Dnieper-Donetsk aulacogen

них трас на прямолінійні відрізки-вектори.

На другому етапі вивчається просторовий розподіл отриманих сукупностей лінементів з використанням кругових троянд-діаграм (рис. 2). На підставі статистичного аналізу азимутальної орієнтації і густини дорифейських тектонітів фундаменту, фанерозойського осадового чохла, денного рельєфу визначаються максимально дина-

мічно виразні напрямки регматичної решітки реалізовані регіональними системами тектонітів. Азимутальні максимуми троянд розглядаються у якості структуроутворюючих систем тектонітів, які надалі піддаються детальному аналізу.

На третьому етапі на підставі морфометричного, структурно-кінематичного та парагенетичного аналізу структурних рисунків тектонітів з

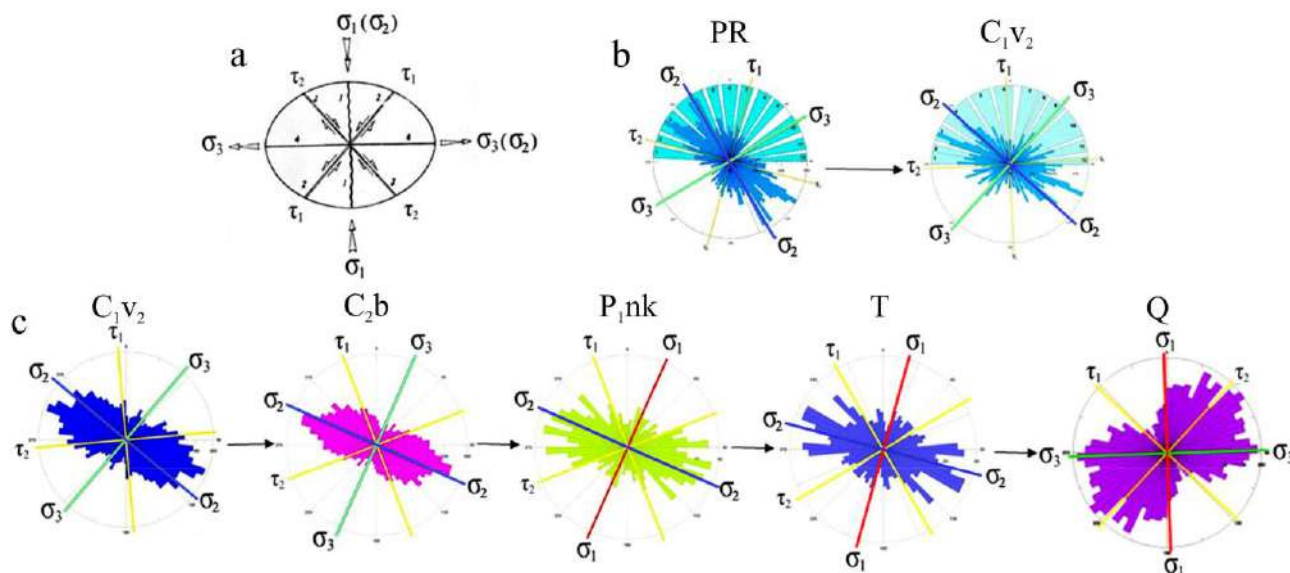


Рис. 2. Схема реконструкції кінематичного механізму просторово-часової інверсії геодинамічних осей напруг у змінному полі тектонічних деформацій в геохронології фанерозоя у межах Дніпровсько-Донецького авлакогена за даними статистичного аналізу троянд-діаграм. а- принципова схема триосового еліпсоїда деформації (за Гзовським, 1975 р.); б, с- реконструкція геодинамічних осей: б- для рифтового етапу, с- для етапів тектонічної інверсії. Осі нормальних стресових напруг: σ_1 - максимального стискання; σ_2 - середнього (проміжного) стискання; σ_3 - мінімального стискання (максимального розтягування); τ_1, τ_2 - максимальних дотичних напруг /

Fig. 2. Pie charts of the spatio-temporal distribution of the stress field tensor in the Dnipro-Donets Paleorift. A – scheme of the deformation ellipsoid tensor, by [3], B – the regional plan, C – the central part (Lokhvytsa, Izyum segments). The stress field tensor: σ_1 – the maximum normal stresses; σ_2 – the average normal stresses; σ_3 – the minimum normal stresses; τ_1, τ_2 – the pair of maximum tangential stresses

використанням еталонних рисунків генетичних типів деформацій визначаються генетичні типи тектонітів, кінематика і напрями переміщень масивів гірських порід за їх площинами (вергентність). Кінематика розломів спочатку визначається на геологічних і сейсмічних розрізах, тоді переноситься на структурні карти поверхів осадового чохла (рис. 3-5). Дані про параметри різновікових систем тектонітів дають можливість реконструювати тектонічні режими їх формування та наступної еволюції. З залученням загальновідомих діагностичних структурно-кінематичних індикаторів з'ясовуються генетичні типи деформацій і кінематичні механізми формування природних геологічних об'єктів - деформаційних структурних парагенезів та їх структурних ансамблів. Для контролю враховуються дані польових інструментальних визначень параметрів тектонітів, що простягаються у межі геологічно закритих

територій палеозападин з прилеглих антекліз і щитів. Далі на основі цифрованих карт структурних поверхів складаються порівняльні тектонічні схеми різновікових тектонітів (рис. 6). По результатах аналізу цих схем з'ясовуються особливості просторового розподілу і структурної позиції систем тектонітів у регіоні, визначається які з них є прямо успадкованими, а які сформувалися незалежно від стародавнього тектонічного каркасу [13]. Такий аналітичний підхід дає можливість встановлювати крім просторових, також динамічні співвідношення систем тектонітів, утворених і ре-активованих в однакових або різних тектонічних режимах.

На четвертому етапі проводиться реконструкція головних параметрів поля тектонічних напруг із врахуванням отриманих даних про генетичний тип, кінематику і вергентність різновікових тектонітів. При цьому виділяються системи тек-

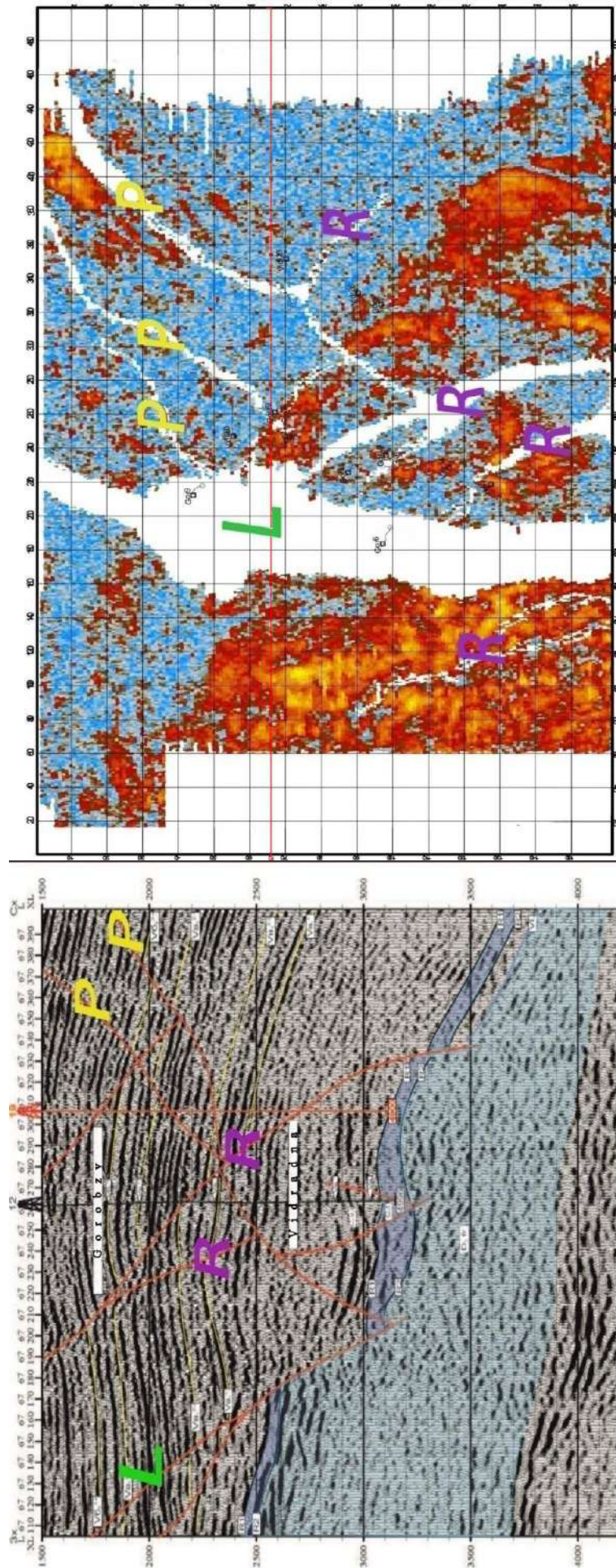


Рис. 3. Приклад генетичної ідентифікації палеозойських систем тектоніків на сейсмічному розрізі і на карті атрибутів сейсмічного хвильового поля осадового чохла Дніпровсько-Донецького авлакогена. Типи тектоніків: L- магістральний скидо-зеув (тріщини відриву), P, R- система діагональних розломів оперення (тріщини сколювання) /

Fig. 3. An example of genetic identification of Paleozoic tectonite systems on a seismic section and on the seismic wave field attribute map of the sedimentary cover of the Dnieper-Donetsk aulacogen. Tectonite types: L- main strike-slip (detachment plume faults (cleavage cracks), P, R- system of diagonal plume faults (cleavage cracks)

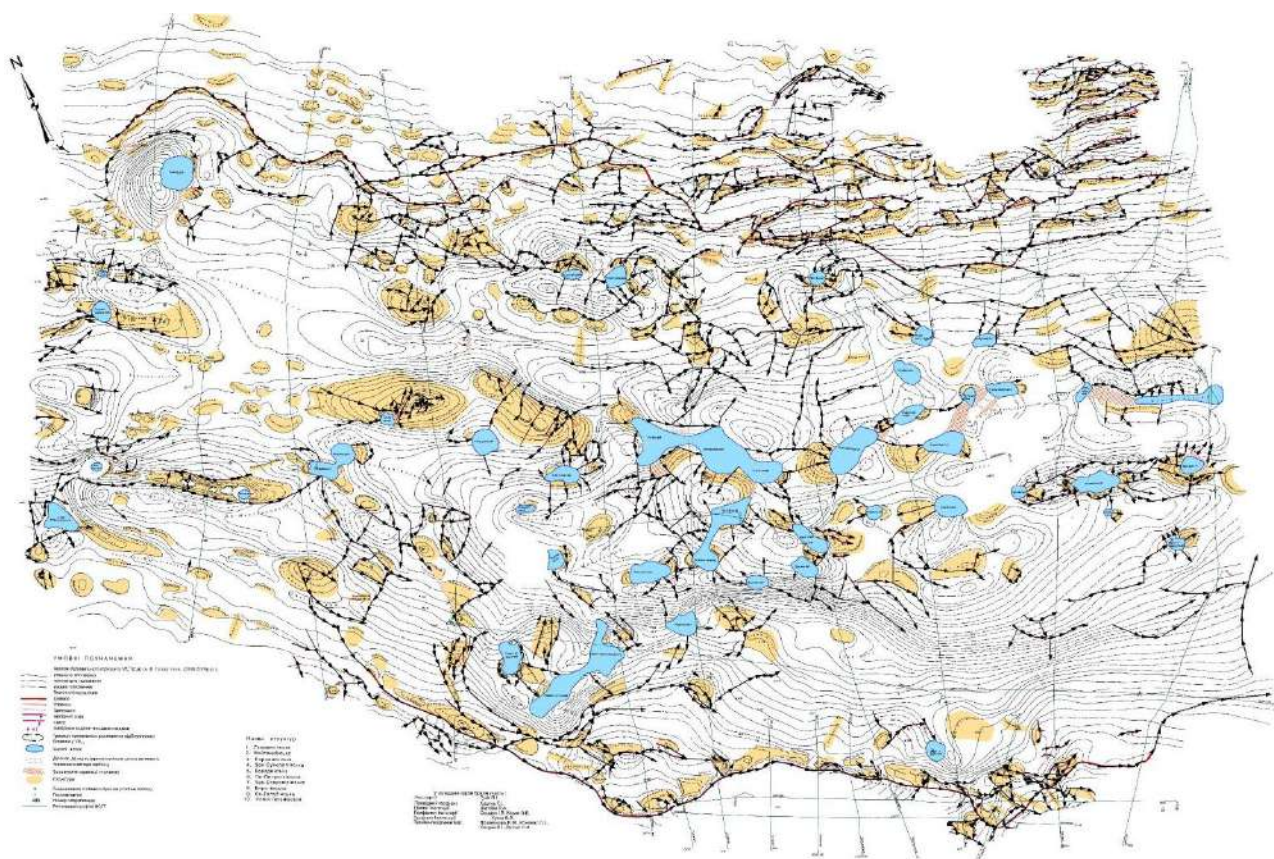


Рис. 4. Приклад застосування технології фрагментації дугоподібних трас розломів на сукупність прямолінійних відрізків на цифровій структурній карті башкирського ярусу середнього карбону у межах Ізюмського сегменту Дніпровсько-Донецького авлакогена /

Fig. 4. An example of the application of the technology of fragmentation of arcuate fault lines to a set of linear vector segments on a digital structural map of the Middle Carboniferous Bashkirian stage within the Izyum segment of the Dnieper-Donetsk aulacogen

тонітів «реверсного» типу – таких, що змінюють у геохронології свій генетичний тип і кінематику рухів (рис. 7). Послідовність операцій з відновлення азимутальної орієнтації геодинамічних осей полів палеонапруг на кругових трояндах-діаграмах і картах аналогічна технології, яка використовується у методі морфолого-кінематичного аналізу [4,6,14]. З врахуванням отриманих даних щодо генетичних типів, кінематики і вергентності регіональних систем тектонітів у структурних поверхнях плитного чохла вирішується зворотна задача - реконструкції геодинамічного типу полів напруг та визначення орієнтування головних стресових осей на горизонтальному майданчику триосьового тензору деформацій. Отримані дані щодо параметрів новітнього поля напруг дають змогу встановити розподіл осей палеонапруг на структурних картах і схемах (рис. 8, 5) [11]. При цьому враховується структурні рисунки лінеаментних зон і кільцевих геологічних структур, дешифрованих за морфометричними та аерокосмогеологічними даними, які використовуються у якості додаткових структурно-кінематичних індикаторів типу поля напруг і деформацій земної кори [17].

На заключному етапі геотектонічного моделювання комплекс отриманих даних щодо просторово-часових змін генетичних типів регіональних систем тектонітів і головних параметрів напружено-деформованого стану земної кори узагальнюється у формалізованому вигляді в *геотектонічній моделі геологічної еволюції геоструктури*, яка складається з двох принципових схем. Перша принципова схема ілюструє *азимутальний розподіл реалізованих напрямів планетарної релієкції тріщинуватості і закономірності змін за ними генетичних типів і кінематики структуроутворюючих систем тектонітів у геологічному часі та об'ємі структурних поверхнь платформного чохла* (рис. 9). Ця схема застосовується далі для визначення кінематичного механізму просторово-часової інверсії параметрів регіонального поля напруги відповідних змін тектонічних режимів і планів деформацій вихідної структури у геохронології. Для цього використовуються порівняльні троянди-діаграми змін азимутальних напрямів у часі та порівняльні тектонічні схеми тектонітів деформаційного каркасу певного етапу геологічного розвитку регіону, як наприклад для реконструкції кінематики стресових осей протягом

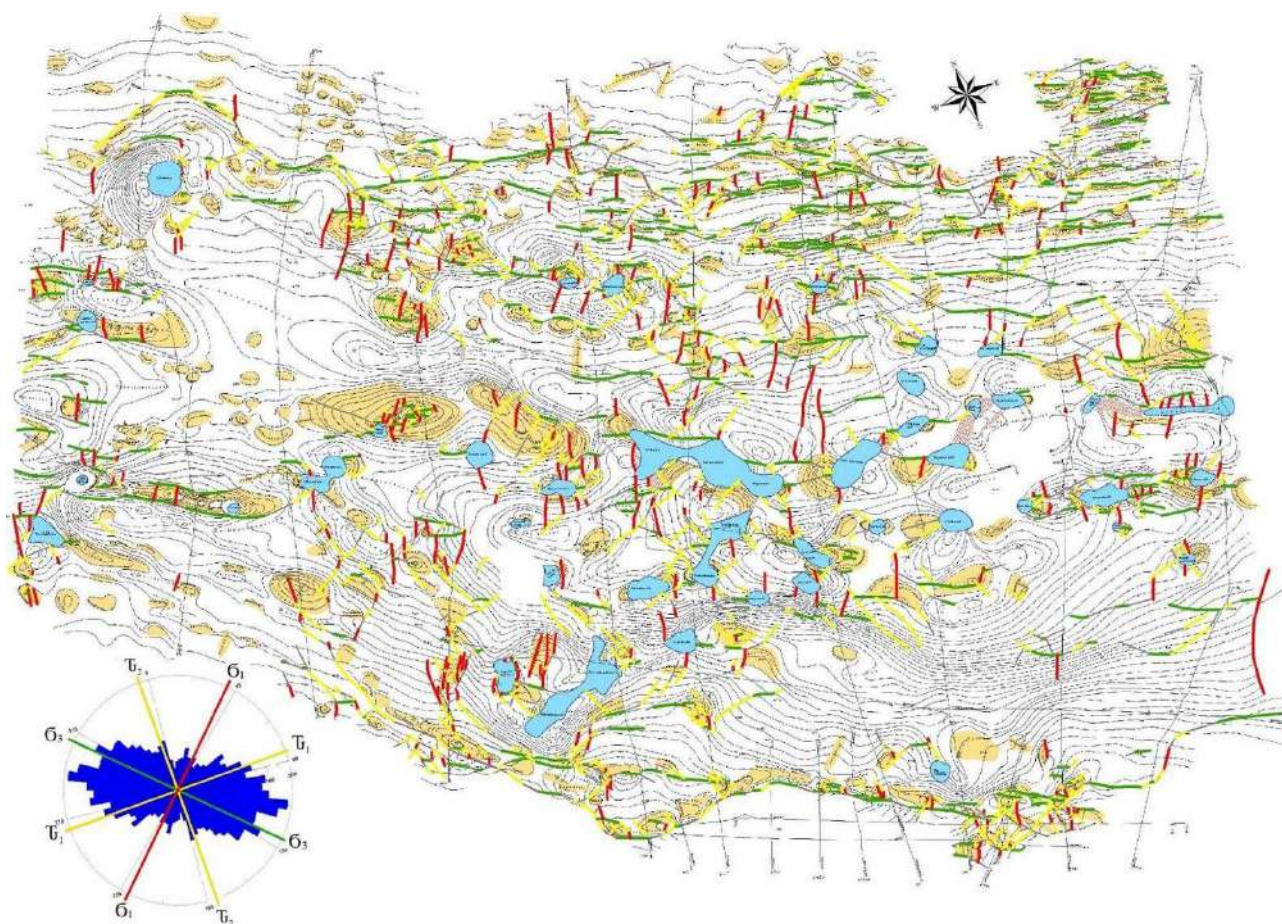


Рис. 5. Приклад реконструкції головних осей поля тектонічних напружень у системах палеозойських тектонітів на цифрованій структурній карті башкирського ярусу середнього карбону у межах Ізюмського сегменту Дніпровсько-Донецького авлакогена.

Вставка: кругова троянда-діаграма азимутального розподілу тектонітів /
 Fig. 5. An example of reconstruction of the main axes of the tectonic stress field in Paleozoic tectonite systems on a digital structural map of the Middle Carboniferous Bashkirian stage within the Izyum segment of the Dnieper-Donetsk aulacogen. Inset: circular rose diagram of the azimuthal distribution of tectonites

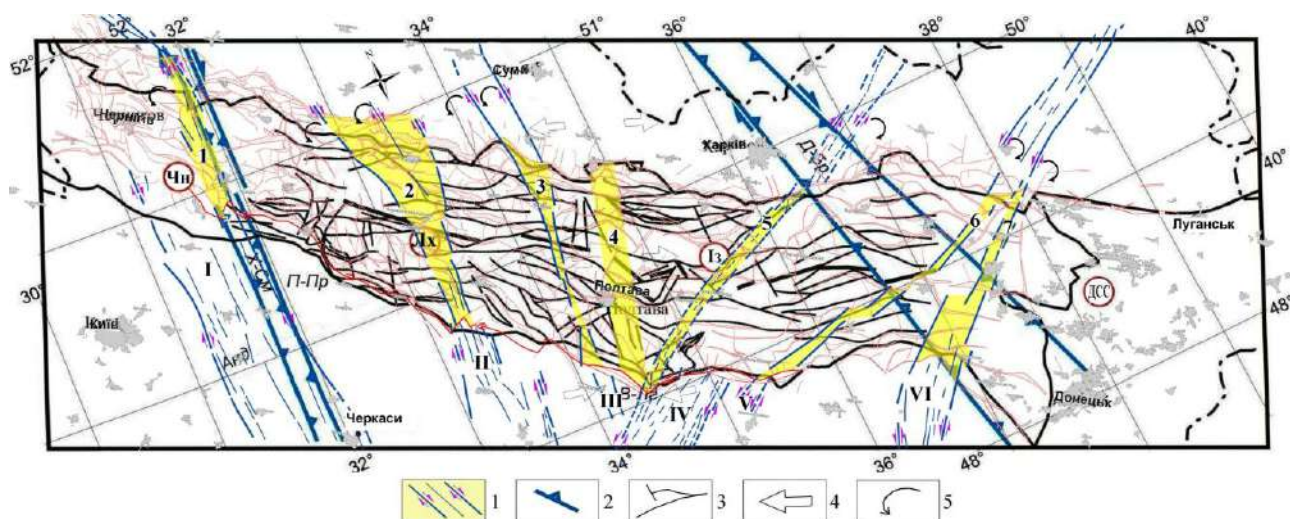


Рис. 6. Порівняльна тектонічна схема просторового розподілу палеозойських рифтогенних систем тектонітів піддольного комплексу девону (чорне) та ре-активованих у пострифтовому каркасі дорифейських глибинних розломів (жовте) у межах Дніпровсько-Донецького авлакогена /

Fig. 6. Comparative tectonic scheme of the spatial distribution of Paleozoic riftogenic systems of tectonites of the Devonian subsalt complex (black) and reactivated in the post-rift framework of pre-Rifean deep faults (yellow) of the Dnieper-Donetsk aulacogen

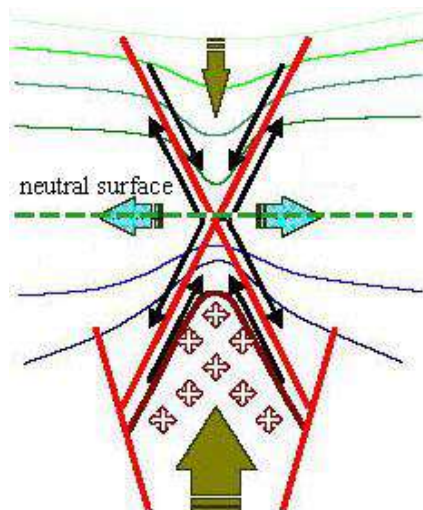


Рис. 7. Принципова кінематична модель формування у ре-активованих системах тектонітів «реверсних розломів» шляхом зміни їх вихідних генетичних типів, за О. Тимурзієвим, 2009 [6] /

Fig. 7. A principle kinematic model of the formation of "reverse faults" in reactivated tectonic systems by changing their initial genetic types, after O. Tymurziev, 2009 [6]

головного рифтового етапу (рис. 10).

Систематизація комплексу отриманих геологічних даних для регіону, що вивчається, дає можливість у рамках геотектонічної моделі скласти концептуальну схему просторово-часової інверсії геодинамічних напруг і тектонічних режимів деформацій земної кори у межах регіональної геоструктури, як наприклад для палеорифтового поясу ДДА (рис. 11). На цих підставах встановлюється загальний напрям і кінематичний механізм природного явища просторово-часової інверсії параметрів поля напруг. Для Сарматії він полягає у наступному [11-13]: на протязі геологічної історії розвитку рифтогенної структури геодинамічні осі у межах зазнали азимутального зміщення у напрямку проти годинникової стрілки на $\sim 15^\circ$ протягом епохи тектогенезу при їх загальному переміщенні від палеозоя до кайнозоя на $\sim 60^\circ$. Протягом фанерозойської еволюції у земній корі Сарматії сформувалися чотири структурних плани деформацій: рифтовий (D–C₁), інверсійний синеклізний (C₂–P₁) і два колізійних платформних (T–K₁) та (K₂–KZ). Отже, отримана геотектонічна модель є результатом комплексного аналізу наявних даних з геологічної будови та історії розвитку внутрішньо-плитної регіональної структури і в подальшому може використовуватись як теоретична основа для з'ясування особливостей структурно-кінематичної еволюції земної кори літосферної плити, до інфраструктури якої вона належить.

Вихідні аналітичні дані. Для проведення тектонофізичних досліджень різновікових деформаційних структур у межах ДДА з залученням геоінформаційних технологій нами було створено цифрові моделі дорифейських, палеозойських систем тектонітів території палеозападини на ос-

нові геологічних карт масштабів 1:500000 (рис. 1, б) та, частково, для центральної і південно-східної частини, у масштабі 1:200000 (рис. 11) [15-17]. Ці моделі порівнювалися з цифровими моделями кайнозойських систем тектонітів, які були отримані по результатах морфометричного аналізу гідрографічної та яружно-балочної мереж на основі карт та схем денного рельєфу і гідрографічної мережі масштабів 1:500 000, 1:1 000 000 (рис. 12,13) [18].

Обговорення результатів.

1. Еволюція розломно-блокової подільності земної кори Дніпровсько-Донецького авлакогена протягом фанерозоя.

Завданням дослідження є виділення і порівняльний аналіз просторового розподілу і тектонічної позиції головних систем різновікових тектонітів, які контролювали тектонічні каркаси фанерозойських деформацій земної кори на території ДДА. Польовими спостереженнями на геологічних відслоненнях на території Українського щита і ДСС встановлено, що окремі тіла тектонітів мають сітчасту внутрішню структуру, а їх системи різного віку відрізняються за просторовим поширенням, тектонічною позицією і вергентністю рухів геомас гірських порід за ними [4,19,20]. З'ясовано, що протягом структурно-кінематичної еволюції земної кори більшість з них зазнала зсувних дислокацій зі значними горизонтальними компонентами переміщень і на даний час мають криволінійні траси (рис. 1,4,6) [2-4,14-17]. Враховуючи, що для коректного визначення азимутального орієнтування тектонітів необхідні прямолінійні елементи, кожен з виділених розломів був розбитий на прямі відрізки вручну [13]. До речі, на даний час є можливість виконати таку операцію за допо-

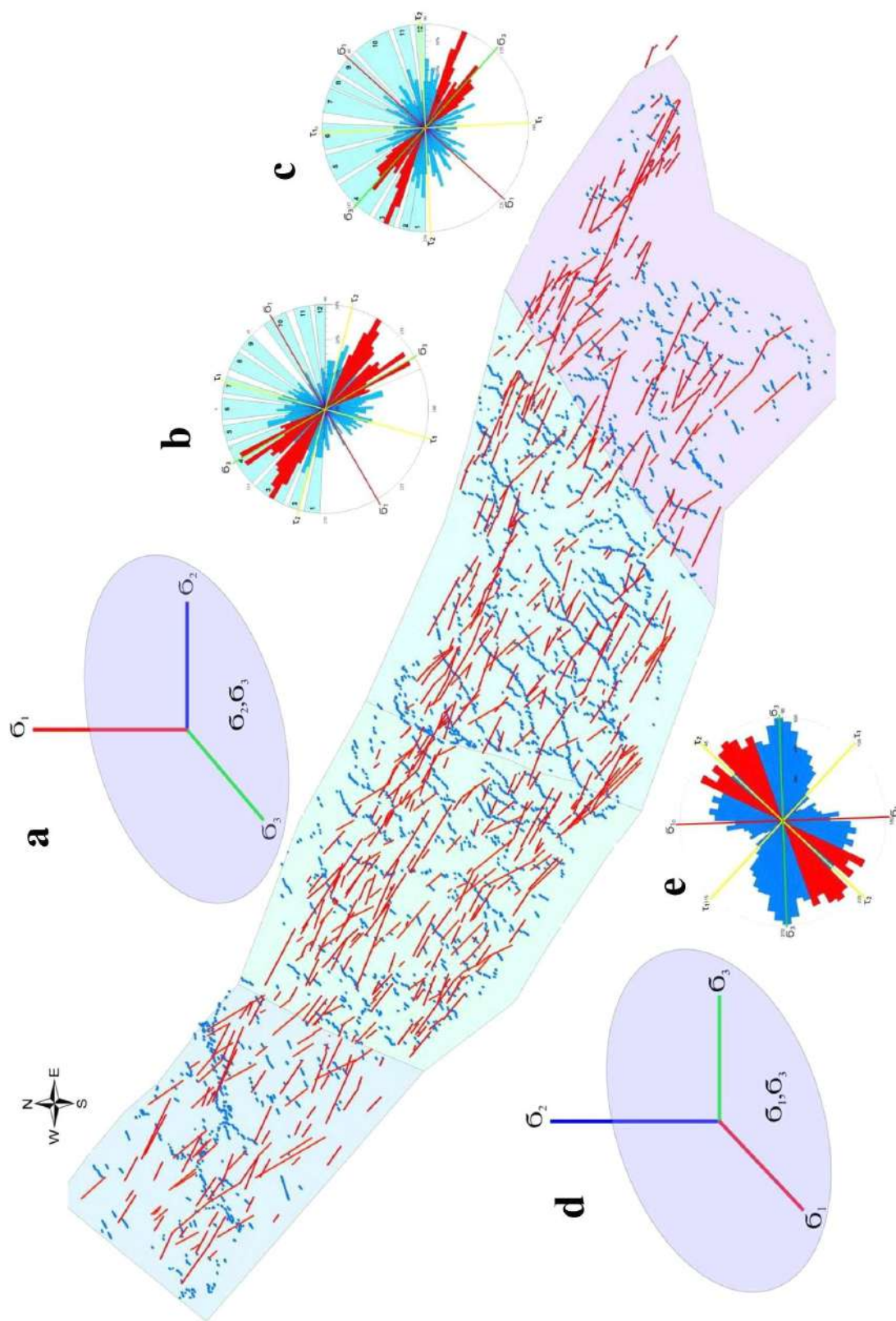


Рис. 8. Порівняльна тектонічна схема просторового розподілу рифтогенних і пострифтових діагональних систем тектонітів і реконструкція геодинамічних осей стресового поля у системах дорифейських (b), палеозойських (c) і кайнозойських (e) тектонітів Дніпровсько-Донецького авлакогену. На врізках: a, d – принципові схеми напружено-деформованого стану земної кори рифтового і колізійного етапів; b, c, e – відновлення осей тектонічних напруг на розах діаграм азимутального розподілу систем тектонітів у: б – фундаменті; в – в осадовому чохлі; д – рельєфі донної поверхні. Решта умовних позначень на рис. 2 / Fig. 8. Comparative tectonic scheme of spatial distribution of riftogenic and post-rift diagonal tectonic systems and reconstruction of geodynamic stress field axes in pre-Rifean (b), Paleozoic (c) and Cenozoic (e) tectonic systems of the Dnieper-Donetsk aulacogen. In the insets: a, d – schematic diagrams of the stress-strain state of the Earth's crust during the rift and collision stages; b, c, e – reconstruction of tectonic systems in: b – basement; c – in the sedimentary cover; d – the day surface relief. The remaining symbols in Fig. 2.

Геологічна епоха	Азимути простягання систем тектонітів, № град												
	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	84-90	273-279	282-288	291-312	315-339	342-351	354-6	9-18	24-30	39-45	54-63	72-78	84-90
PR ₂		сколи, * зсуви		відриви, скиди	відриви, скиди			сколи, зсуви			сколи, зсуви		сколи, зсуви
D+C ₁	сколи, зсуви		відриви, скиди	відриви, скиди		сколи, зсуви			сколи, зсуви			сколи, зсуви	
C ₂₊₃			сколи, підкиди			сколи, зсуви			сколи, зсуви			сколи, зсуви	
P ₂ + T			сколи, підкиди			сколи, зсуви			сколи, зсуви			сколи, зсуви	
J + K		сколи, підкиди			сколи, зсуви			відриви, скиди			сколи, зсуви		відриви, скиди
P		сколи, підкиди			сколи, зсуви			відриви, скиди			сколи, зсуви		відриви, скиди
N	сколи, підкиди			сколи, зсуви		відриви, скиди				сколи, зсуви		відриви, скиди	
Q	сколи, підкиди			сколи, зсуви		відриви, скиди				сколи, зсуви		відриви, скиди	

Рис. 9. Принципова схема азимутального розподілу у Дніпровсько-Донецькому авлакогені реалізованих напрямів планетарної решітки тріщинуватості та просторово-часової інверсії генетичних типів систем тектонітів за ними у фанерозі. *Генетичні типи тріщинуватості: сколи і горизонтальні зсуви; відриви і скиди; підкиди і насуви /

Fig. 9. Schematic diagram of the azimuthal distribution in the Dnieper-Donetsk aulacogen of realized directions of the planetary lattice of fracturing and spatiotemporal inversion of genetic types of tectonic systems behind them in the Phanerozoic. *Genetic types of fracturing: cleavages and horizontal shifts; detachments and faults; thrusts and thrusts

могою процедури Split Line At Vertices з розділу Data Manager Tools у програмному пакеті ArcGIS [21]. По результатах цієї процедури криві траси розломів було розбито на сукупність векторів, обмежених вертексами (вузли ліній, послідовність яких визначає лінійний об'єкт у векторному форматі геоданих) (рис. 11). Для кожного з отриманих векторів розраховувалися азимутальні напрямки за допомогою модуля «Polar Plots and Circular Statistics» для ArcGIS, розміщеного у вільному доступі в мережі Інтернет [22]. За допомогою цього модуля в ArcGIS будувалися кругові троянди-діаграми, на яких були отримані значення азимутів простягання регіональних систем тектонітів в інтервалі від 0 до 360°, обраних у якості головних (рис. 2).

Далі визначалися закономірності просторового розподілу підвищеної густини розломів обраного азимутального діапазону. Для цього для дорифейської, палеозойської і кайнозойської систем тектонітів виділені напрямки, на основі цифрових карт різновікових структурних поверхів були побудовані схеми тектонічних каркасів деформацій на всю територію ДДА та окремо для складових тектонічних сегментів (Чернігівського, Лохвицького, Ізюмського, Західно-Донецького грабена) з додаванням троянд-діаграм відповідного періоду геохронології. На заключному етапі складалися порівняльні тектонічні схеми та будувалися порівняльні моделі структурних взаємодій різновікових систем тектонітів, як,

наприклад, рифтових ранньорифейських і палеозойських та післярифтових кайнозойських (рис. 1, 6, 8).

У літосфері Сарматії раніше було виявлено всього вісім азимутальних напрямів регматичної решітки, використаних тектонітами [2,3]. При цьому встановлено, що системи тектонітів різного віку та азимутальної орієнтації відрізняються за структурно-динамічним проявом, зумовленим змінами у геохронології їх генетичних типів: 285 - 290° (PR₃, O, S – сколи, зсуви, P-підкиди, насуви), 310 - 315° (D-C₁- підкиди, насуви, N-сколи, зсуви), 340 - 345° (PR₃- відриви, скиди, C₁₋₂, C₂₋₃, P₂, T₂₋₃ - сколи, зсуви), 0° та 90° (D - сколи, зсуви), 15–20° (PR₃, O, S-сколи, зсуви, P- відриви, скиди), 45–50° (відриви, скиди), 70–75° (PR₃ – підкиди, насуви, C₁₋₂, C₂₋₃, P₂, T₂₋₃ – сколи, зсуви).

З використанням геоінформаційних технологій і даних сейсморозвідки, у тому числі за технологією 3D, створено аналітичну електронну базу різновікових тектонітів ДДА у кількості понад 32 тисяч. На підставі статистичного аналізу у фундаменті і структурних поверхах осадового чохла палеозападини уточнено їх азимутальний розподіл і серед них встановлено *шість головних регіональних структуроутворюючих напрямів* (два ортогональних і чотири діагональних), реалізованих в азимутах: 1 - 273-279° і 9-18°, 2 - 282-288° і 24-30°, 3 - 291-312° і 39-45°, 4 - 315-339° і 54-63°, 5 - 342-351° і 72-78°, 6 - 354-6° і 84-90° [11-13] (рис. 2, 9).

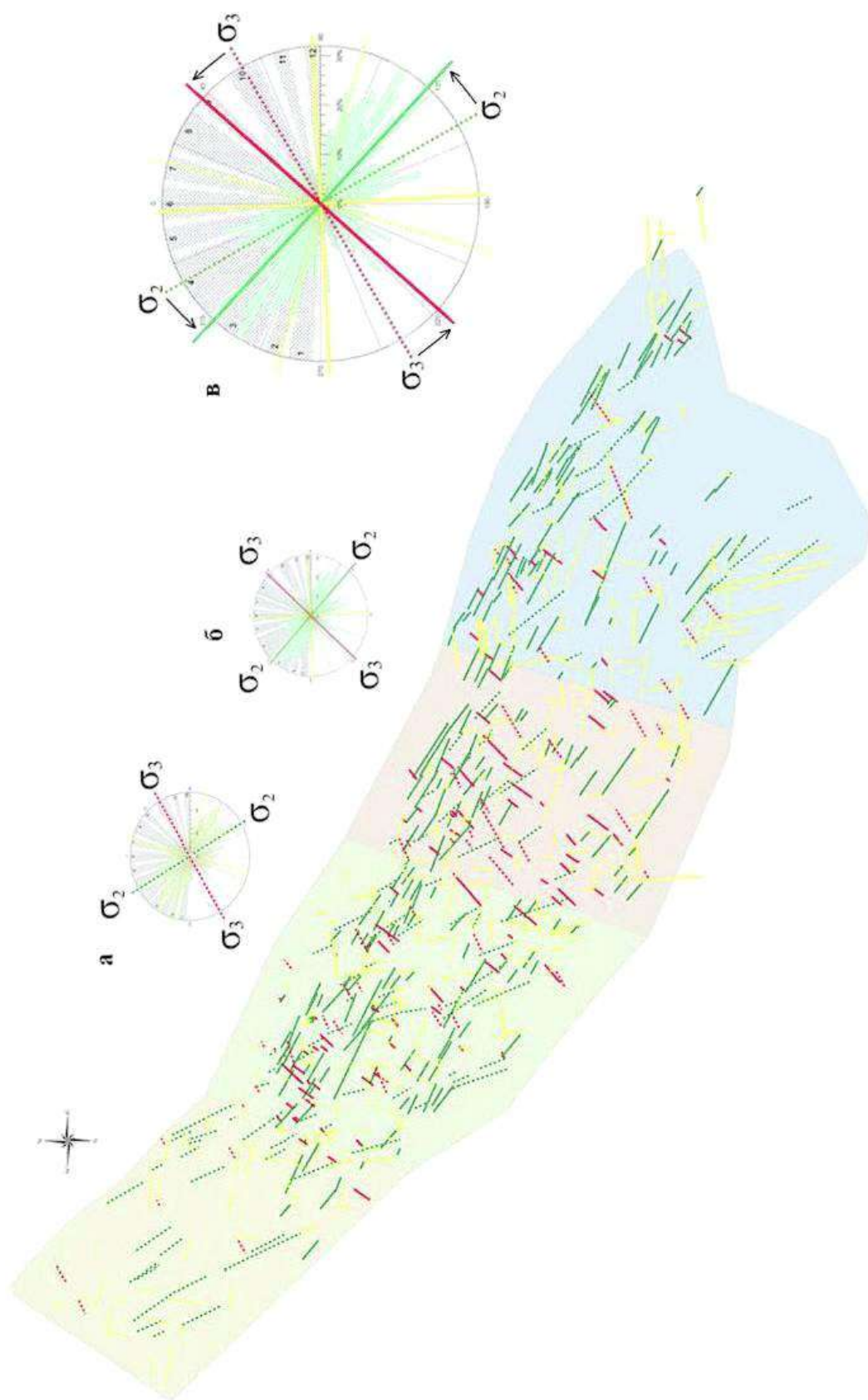


Рис. 10. Приклад ідентифікації генетичних типів і кінематичного механізму просторово-часової інверсії геодинамічних осей напруг у рифтогенних системах тектонітів Дніпровсько-Донецького авлакогена на порівняльній схемі рифтогенної решітки дорифейських та палеозойських систем тектонітів. На візках: кругові троянди-діаграми з визначенням головних осей поля напруг рифтового етапу: а – у поверхні дорифейського фундаменту, б – верхньовізейському комплексу осадового чохла; в – діагностика кінематичного механізму просторово-часової інверсії параметрів напружено-деформованого стану земної кори / Fig. 10. An example of identification of genetic types and kinematic mechanism of spatiotemporal inversion of geodynamic stresses in riftogenic systems of tectonites of the Dnieper-Donetsk aulacogene on a comparative diagram of the riftogenic lattice of pre-Rifean and Paleozoic tectonite systems. Insets: circular rose diagrams with determination of the main axes of the stress field of the rift stage: а – at the surface of the pre-Rifean basement, б – Upper Visean complex of the sedimentary cover; в – diagnostics of the kinematic mechanism of spatiotemporal inversion of parameters of the stress-strain state of the Earth's crust

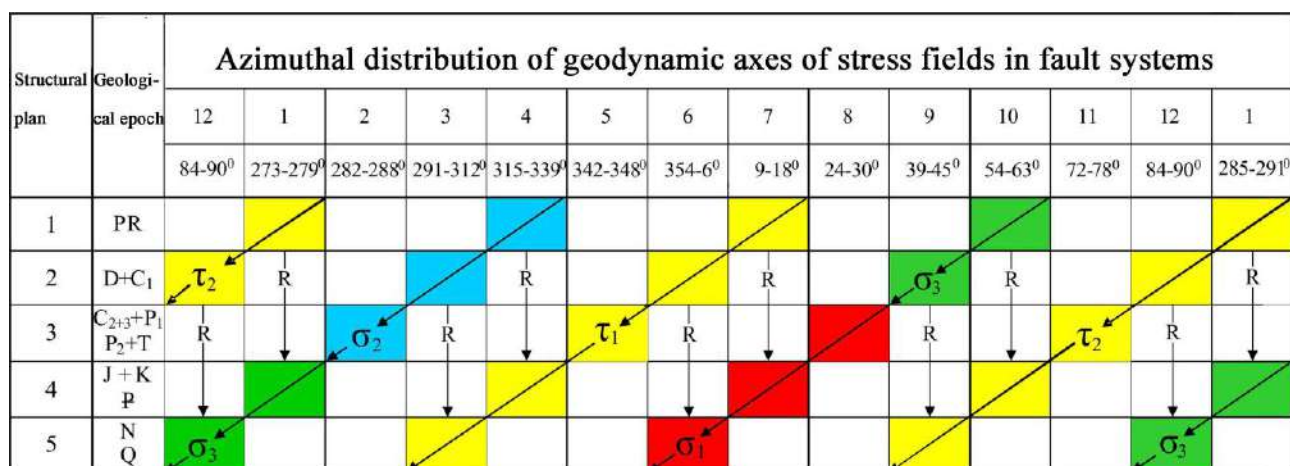


Рис. 11. Принципова схема просторово-часової інверсії осей геодинамічних напруг і еволюції тектонічних режимів та структурних планів деформацій Дніпровсько-Донецького авлакогена у фанерозої.

Осі нормальних стресових напруг: σ_1 - максимального стиску; σ_2 - середнього (проміжного) стиску; σ_3 - мінімального стиску (максимального розтягу); τ_1, τ_2 - максимальних дотичних напруг;

R - ре-активовані системи тектонітів, що зазнавали змін генетичного типу («реверсні розломи») /

Fig. 11. Schematic diagram of the spatiotemporal inversion of geodynamic stresses and the evolution of tectonic regimes and structural plans of deformations of the Dnieper-Donetsk aulacogen in the Phanerozoic. Normal stress axes: σ_1 - maximum compression; σ_2 - average (intermediate) compression; σ_3 - minimum compression (maximum tension); τ_1, τ_2 - maximum tangential stresses; R - reactivated systems of tectonites that underwent genetic type changes.

Symbol: R - "reverse faults"

За результатами статистичного аналізу побудованих троянд-діаграм з'ясовано, що у структурних планах дорифейського метаморфізованого фундаменту і палеозойських складчастих поверхів ДДА проявлені два регіональні азимутальні максимуми у північно-західній діагональній системі тектонітів (рис. 14, 1, 2, b) [13]. Орієнтація цих систем тектонітів у просторі Дніпровського грабена співпадає з генеральним напрямом простягання осі палеорифтового поясу, утворюючи типовий для інфраструктури деформаційних зон сколювання зсувний рисунок тектонітів (рис. 14, 15) [6-10].

Разом ці просторово близькі та динамічно спряжені тектоніти склали рифтогенну *магістральну* систему. Згідно нашої кінематичної моделі рифтогенезу за їх напрямками на дорифтовому етапі у «холодній» земній корі Сарматії закладалася ранньорифейська «зародкова» лінійна мегазона сколювання (горизонтального зсування) [23, 11]. Передбачено, що в інфраструктурі плити в горизонтально-зсувному режимі за механізмом Pull-apart basin сформувалася низка вузьких трогових улоговин, заповнених континентальними моласоїдними товщами.

У відповідності до моделі, на головному рифтовому етапі, протягом девонського епізоду епіплатформного рифтогенезу, у земній корі Українського щита за *магістральною* системою тектонітів сформувався скидо-розсувний каркас майбутнього Дніпровського грабена. Доплитний комплекс, що накопичився у ранньорифейських тро-

гових улоговинах, тоді перекривався плитними рифтовими формаційними комплексами палеозою. В обстановці загально-плитного розтягу блоки земної кори розсувалися у південному напрямку від вихідної лінії ранньорифейських трогових басейнів, утворюючи плечі і що молодші скидові уступи-щаблі, наближені до осьової частини грабена. Формування поясу девонських рифтових грабенів відбувалося за механізмом деформацій простого розтягу земної кори у полі напруг з горизонтальною орієнтацією осей проміжного (σ_2) і мінімального (σ_3) стресу (максимального розтягу) та вертикальною віссю максимального стресу (σ_1), при цьому за простяганням поясу розташовувалася вісь σ_2 , ортогонально - вісь σ_3 (рис. 8). У таких геодинамічних умовах в гірських породах рифтогенного палеобасейну утворилися відкриті для мантийних струменів вертикально орієнтовані тріщини відриву і розриви-скиди.

Одночасно рифтогенез у континентальній корі Сарматії контролювався *трансформною* системою зсувів (скидо-зсувів), сформованих у ре-активованій меридіональній (354-6°) системі дорифейських тектонітів. Уздовж динамічно спряженої системи зсувів-трансформ утворилися "тектонічні рейки" рифтингу, за якими розсувалися плечі рифту, закладалася поперечна сегментація майбутнього рифтового поясу та латерально зміщувалася вісь Дніпровського грабена (рис. 14) [23].

Тектоніти нижньопермського і тріасового віку мають аналогічні азимутальні максимуми у рифтовому північно-західному напрямку, але в них

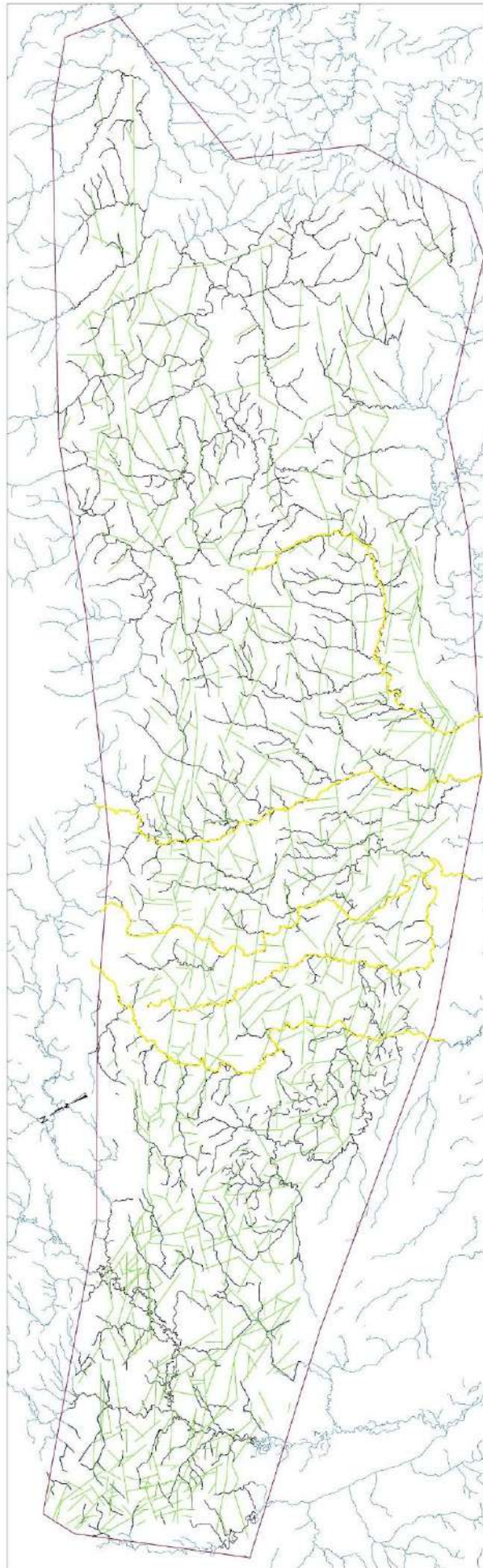


Рис. 12. Порівняльна тектонічна схема сучасної гідрографічної мережі (чорне),

та систем тектонітів у поверхні дорифейського фундаменту (зелене) Дніпровсько-Донецького авлакогена; річкові долини, що розглядаються (жовте) /
 Fig. 12. Comparative tectonic diagram of the modern hydrographic network and tectonic systems at the surface of the pre-Rifean basement of the Dnieper-Donetsk aulacogen;
 river valleys under study (yellow)

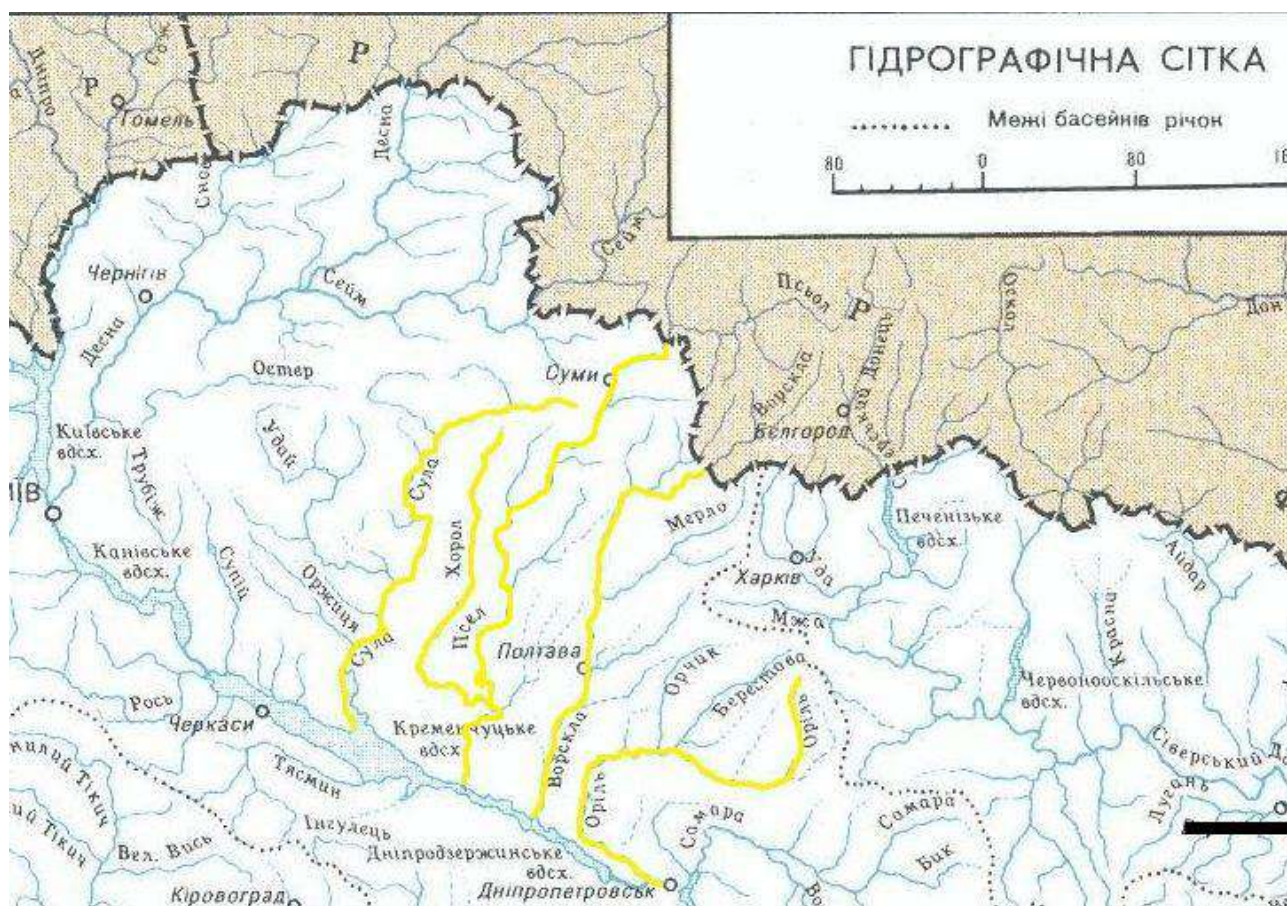


Рис. 13. Розподіл річкових систем басейну Дніпра на території Дніпровсько-Донецького авлакогена на фрагменті карти гідрографічної мережі України; річкові долини, що розглядаються (жовте) / Fig. 13. Distribution of river systems of the Dnieper basin on the territory of the Dnieper-Donetsk aulacogen, on fragment of the map of the hydrographic network of Ukraine; river valleys under study (yellow)

додатково проявляється третій – широтний максимум (рис. 2, с). Це може бути свідченням успадкованості напрямку ліній герцинської складчастості (заальська фаза) та вергентності пізньогерцинських рухів у ранньокімерійську епоху тектогенезу. Проте P_1 - T формаційні комплекси платформного чохла тут не аналізовані через повний розмив P_2 комплексу перших на теренах палеозападини та обмежене поширення у розрізі других на ділянках глибокого денудаційного зрізу.

Системи тектонітів, які успадковують північно-західний і меридіональний напрями дорифейських зон розломів, частково ре-активовані в рифтовій решітці (рис. 4, b). Натомість в інверсованій структурі авлакогена дорифейські системи, що ре-мобілізовані в каркасі альпінотипних деформацій, мають переважно північно-східний і широтний напрями (рис. 4, с). При цьому, є певні відмінності у розподілі максимально виразних азимутальних максимумів ре-активованих тектонітів по сегментах авлакогена. На порівняльній схемі просторового розподілу і змін напрямів ре-активованих систем дорифейських «реверсних» тектонітів встановлено, що на тлі регіональних рифтових максимумів північно-західних напрямів у

сегментах західної частини палеозападини (Чернігівський, Лохвицький) максимально проявлені субмеридіональні напрями (рис. 16, а,б), натомість у східній частині (Ізюмський і Західно-Донецький грабен) – субширотні напрями (рис. 16, в,г). Такі особливості будови регіонального деформаційного каркасу тектонічної інверсії рифтогенної структури можуть свідчити про формування у межах Західної та Східної частин палеорифтового поясу окремих планів інверсійних деформацій. Результатом структурної диференціації загального каркасу стало утворення двох геодинамічно відносно самостійних Західної і Східної мікроплит з протилежною кінематикою рухів за субрегіональними системами тектонітів, розділених у центрі Дніпровського грабена, на кордоні Лохвицького та Ізюмського сегментів, тектонічної віссю кінематичної симетрії, яка протрасована нами за комплексом діагностичних геологічних і морфометричних ознак уздовж Ворсклянського тектонічного щабля (цифра II на рис. 16).

Протягом епох платформної активізації відбувалася ре-мобілізація стародавніх систем тектонітів, вихідний генетичний тип яких змінювався у відповідності до меридіонального напрямку

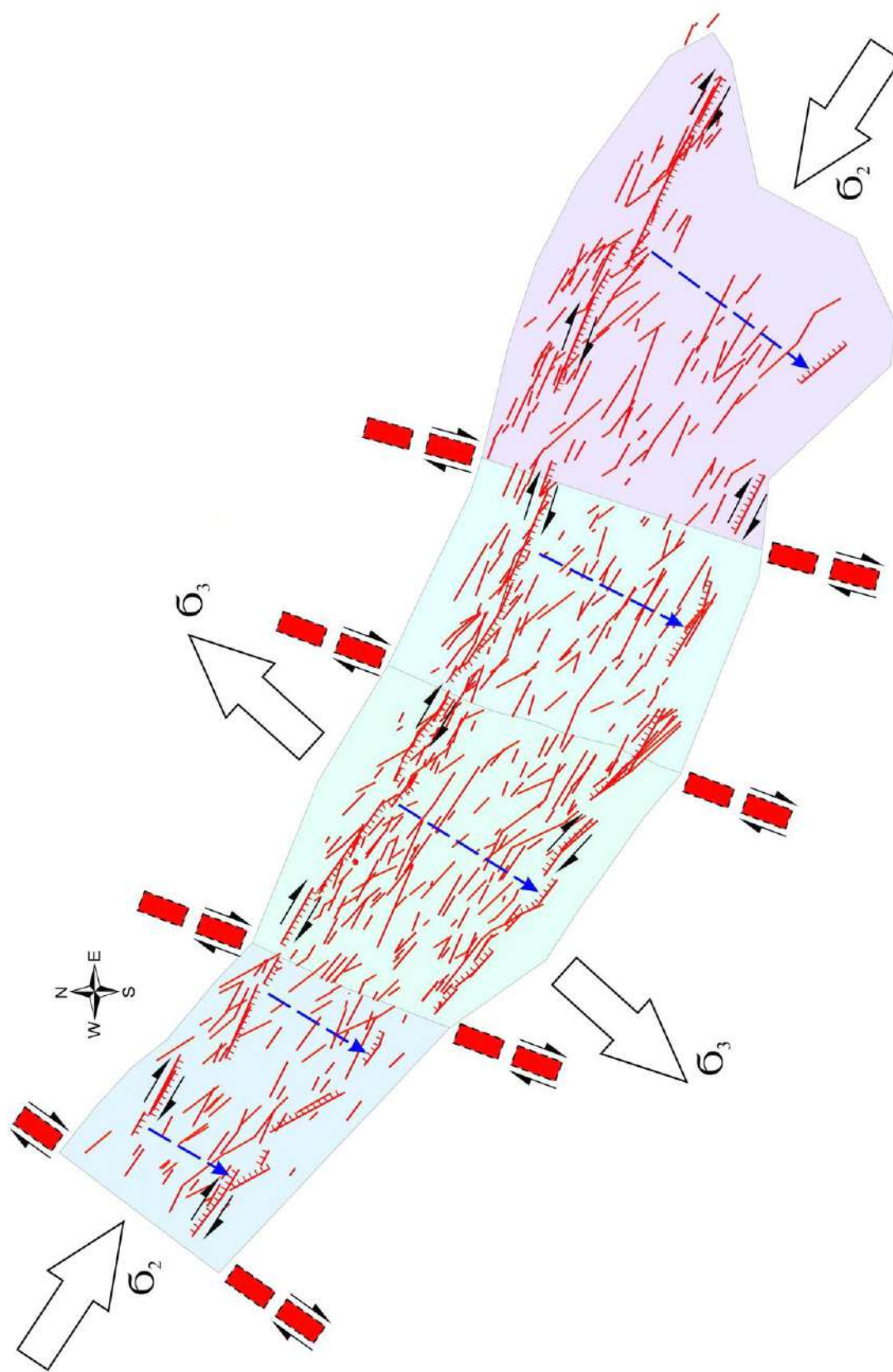


Рис. 14. Принципова кінематична модель рифтогенезу на тектонічній схемі рифтогенного каркасу Дніпровсько-Донецького авлакогену. Стрілки: геодинамічні осі нормальних стресових напруг (білий): σ_2 - проміжного стиснення, σ_3 - мінімального стиснення (максимального розтягу); напрям розсування геоблоків від дорифейської «зародкової» мегазони сколювання (синій). "тектонічні рейки рифтінгу" - горизонтальні зсуви-трансформи (червоний пунктир) / Fig. 14. Principle kinematic riftogenesis model on the tectonic scheme of the Dnieper-Donetsk avlucogen.model of the formation of the Dnieper-Donetsk rift. Arrows: geodynamic axes of normal stress (white): σ_2 - intermediate compression, σ_3 - minimum compression (maximum tension); direction of geoblocks spreading from the pre-Rifean "germ" magazone of cleavage (blue). "tectonic rifting rails" - horizontal shear-transforms (red dotted line)

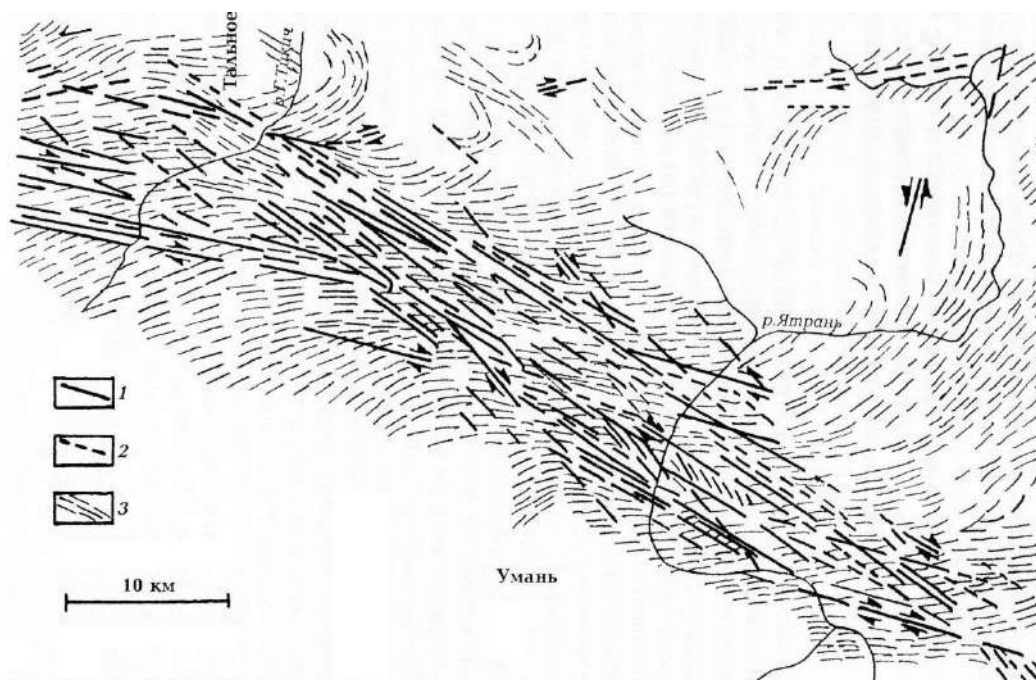


Рис. 15. Тектонічна модель типової деформаційної зони сколювання у структурі Українського щита, за О. Гінтовим та ін. [4] /

Fig. 15. Tectonic model of the cleavage deformation zone in the structure of the Ukrainian Shield, by O. Gintov et al. [4]

осі колізійного стресу. Тектоніти рифтогенних *магістральної* і *трансформної* систем, а також північно-східної діагональної ($9-18^\circ$, $39-45^\circ$, $54-63^\circ$) і субширотної гілки ортогональної систем ($84-90^\circ$, $273-279^\circ$) зазнали ре-активації в обстановці загально-плитної колізії у регіональному горизонтально-зсувному полі напруг. При цьому вони зазнавали змін вихідного генетичного типу і кінематики, і відповідно, структурно-динамічного прояву в інверсованому рифтовому каркасі. За цими напрямками утворювались «реверсні» системи тектонітів, які брали участь у формуванні тектонічних решіток деформацій у молодших за віком структурних поверхнях платформного чохла [11].

Внаслідок цього уздовж ліній реверсних систем *магістральних* тектонітів закладалися головні структурні зони прирозломної пізньогерцинської складчастості (рис. 10). Тектоніти північно-східної системи кайнозойського інверсійного каркаса успадкували лінії дорифейських систем глибинних розломів у південно-східній частині палеозападини. Завдяки їх ре-мобілізації у підкидно-насувному і зсувному режимі у ранню (ларамійська фаза) та новітню (аттична фаза) епохи кайнозойського тектогенезу найбільших деформацій зазнала рифтова структура Західно-Донецького грабена.

У наступному розділі обговорюються структурні наслідки альпінотипних колізійних деформацій палеорифта за ре-активованими системами тектонітів.

2. Особливості структурно-динамічного прояву ре-активованих систем тектонітів у структурі Дніпровсько-Донецького авлакогена.

Протягом фанерозоя в осадовому чохлі ДДА сформувалися три головних структуроутворюючих системи тектонітів [11-13]: рифтогенна палеозойська, яка слугувала у пізньогерцинську епоху каркасом герцинської інверсійної складчастості (заальська і, можливо, пфальцьська фази), та дві кайнозойських системи, утворених колізійними рухами у ранню (ларамійська фаза, сенон-ранній еоцен) і новітню (аттична фаза, неоген-квартер) епохи альпійського тектогенезу. Разом з кайнозойськими, системи ре-активованих дорифейських тектонітів об'єднуються у геодинамічно спряженому новітньому тектонічному каркасі альпінотипних колізійних деформацій земної кори авлакогена. Розглянемо просторове і динамічне співвідношення ре-активованих дорифтових, рифтогенних палеозойських та післярифтових (інверсійних) кайнозойських тектонітів різних азимутальних напрямків у ДДА (рис. 17).

Інструментальними вимірами у різних тектонічних регіонах Сарматії визначено північну вергентність герцинських, південно-західну ларамійських та південно-східну аттичних систем тектонітів, у тому числі в ДДА [19, 20]. В розрізі осадового чохла палеозападини герцинські тектоніти з розмивом та кутовою незгодою перекриваються підшвою мезозойського комплексу. Ларамійські тектоніти перетинають кам'яновугільні та мезозойські відклади і перекриваються підшвою па-

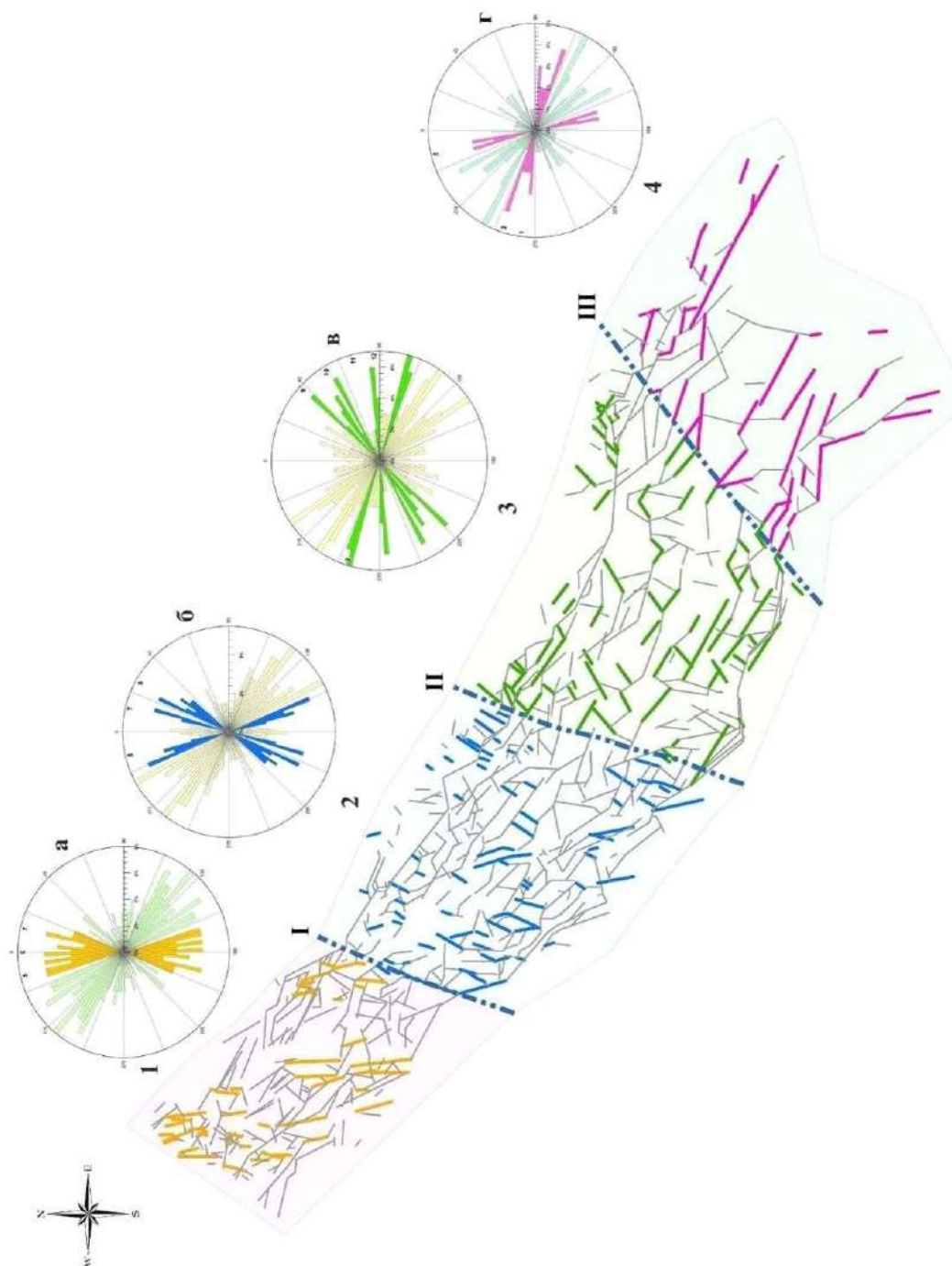


Рис. 16. Тектонічна схема просторового розподілу і змін напрямів ре-активованих систем доріфейських «реверсних» тектонітів на тлі палеозойського рифтогенного каркасу в межах сегментів Дніпровсько-Донецького авлакогена. На візках: а-г- виділення ре-активованих систем як азимутальних максимумів на кругових трояндах-діаграмах у межах сегментів: 1 – Чернігівського (жовтий), 2 – Лохвицького (зелений), 3 – Ізюмського (синій), 4 – Західно-Донецький грабен (фіолетовий). Міжсегментні кордони, складені ре-активованими системами доріфейських тектонітів (синій пунктир): I – Західноінгулецька, II – Верховцівсько-Львівська, III – Центральноприазовсько-Слов'яногірська /

Fig. 16. Tectonic scheme of spatial distribution and changes in directions of reactivated systems of pre-Rifean "reverse" tectonites against the background of the Paleozoic riftogenic framework within the segments of the Dnieper-Donetsk aulacogen. Insets: a-d - highlighting of reactivated systems as azimuthal maxima on circular rose diagrams within the segments: 1 - Chernihiv (yellow), 2 - Lohvitsky (green), 3 - Izium (blue), 4 - Western Donetsk graben (purple). Intersegmental boundaries formed by reactivated systems of pre-Rifean tectonites (blue dotted line): I - Western Inguletska, II - Verkhovtshiv-Lgov, III - Central Pryazovsko-Slovyanogorsk

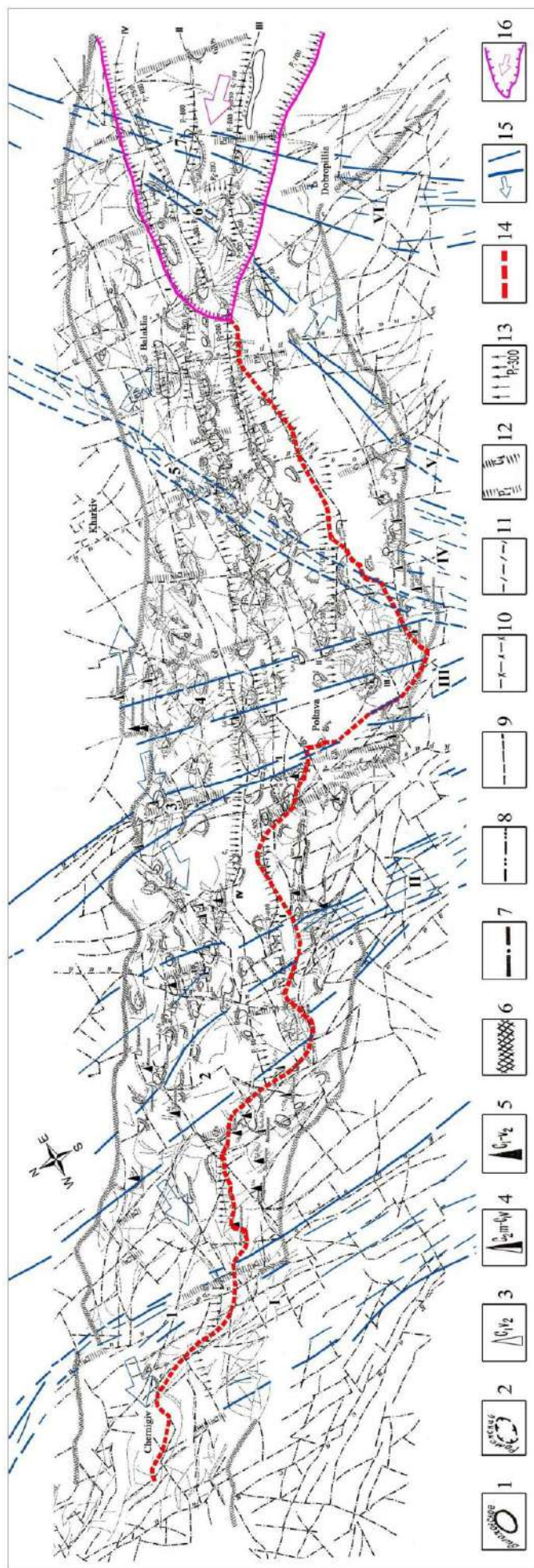


Рис. 17. Порівняльна тектонічна схема рифтогенних і пострифтових систем тектонітів ре-активованих у зонах дорифейських глибинних розломів та комплексів фанерозойського осадового чохла Дніпровсько-Донецького авлакогена (картографічна основа за ред. Глушко, 1978, з доповненнями за Барташчуком О. В., 2019). *Умовні позначення:* 1- структури чохла; 2- соляні штоки; 3-5- родовища: газові, газоконденсатні, нафтові; 6-11- розломи: крайові, у фундаменті, девоні, карбоні, пермі, на локальних структурах; 12-13- зміни товщин осадових комплексів: за стратиграфічною приналежністю, за градієнтними зонами; 14- межі тектонічних районів різних типів інверсійних деформацій; 15- міжсегментні кордони кінематикою та вергентністю рухів за системами тектонітів; 16- кордон Західно-Донецької покривно-складчастої області /

Fig. 17. Comparative tectonic scheme of riftogenic and post-rift systems of tectonites reactivated in zones of pre-Rifean deep faults and complexes of the Phanerozoic sedimentary cover of the Dnieper-Donetsk aulacogen (cartographic basis according to ed. Glushko, 1978, with additions according to Bartashchuk O., 2019). Symbols: 1- cover structures; 2- salt stocks; 3-5- deposits: gas, gas condensate, oil; 6-11- faults: marginal, in the basement, Devonian, Carboniferous, Permian, on local structures; 12-13- changes in the thickness of sedimentary complexes: by stratigraphic affiliation, by gradient zones; 14- boundaries of tectonic regions of different types of inversion deformations; 15- intersegmental boundaries by kinematics and vergence of movements along tectonic systems; 16- boundary of the Western Donets nappe-folded region

леогену з розмивом та кутовою незгодою. Аттичні тектоніти наскрізь пронизують кам'яновугільні, мезозойські, палеогенові та неогенові відклади і перекриваються антропогеновими з розмивом та кутовою незгодою. Завдяки близькості віку, просторового поширення і структурно-тектонічної позиції у межах палеозападини ларамійські та аттичні тектоніти на цій території природно об'єднуються у спільну систему альпінотипних тектонітів (рис. 2, 8-10).

Кордони неотектонічних блоків на теренах ДДА виділялися стандартними методами морфометричного аналізу. Задовільно визначаються нами у денному рельєфі новітні підкиди (насуви) і, меншою мірою, скиди та зсуво-скиди і розсуви. Підкиди та скиди утворюють горстові підняття, тектонічні тераси і шаблі у поверхні фундамента та структурних поверхнях осадового чохла. Ускладнюючи будову північного моноклінального схилу борту, вони прилягають з півночі до зони крайового порушення. Його площа на всьому протязі зазнала тут дугоподібних дислокацій і набула характерної для зон горизонтального зсування кулісної будови. Прикладом структурного прояву альпійської неотектонічної активізації є низка крупних підняття у підосві кайнозою довжиною у десятки кілометрів і висотою понад 100 м, що розташовується на північному схилі Західно-Донецького грабена. В денному рельєфі вони виражені видовженими пагорбами заввишки 20 - 100, розділених балками, річковими долинами тощо [24]. По фронту підкидів та насувів у палеозойських відкладах у прилеглих частинах насунутих блоків зазвичай розвинені вузькі та похилі складки насунання, а також структурні лінії «перетиснутої», вузької та більш амплітудної підкидо-складчастості. Такі пострифтові деформації викликали формування на південно-східній периферії у структурі інверсованого авлакогена Західно-Донецької покривно-складчастої області (рис. 17, крайня права частина) [25]. Геологічні дані, підтверджені положеннями гірничої механіки, є свідченням того, що альпінотипні підкидо-насувні каркаси сформувалися в умовах азимутального орієнтування ре-активованих систем тектонітів будь якого віку і вихідного генетичного типу перпендикулярно до розташованої за меридіаном осі максимального загально-плитного стресу (рис. 2, 8-10).

Новітні скиди, скидо-зсуви, скидо-розсуви в ДДА розповсюджені обмежено, переважно в центральній частині Дніпровського грабена. За їх участі не утворилися великі амплітудні і протяжні лінійні структури, тому вони непевно простежуються в орогідрографії як улоговини, сідловини та ін. негативні структурні форми. Формування скидів і розсувів в інверсованій структурі авла-

когена ми пов'язуємо з утворенням новітніх геодинамічних зон розтягу земної кори [11]. Зони розтягу, у тому числі пов'язані з деформаційними зонами зсування [26], відповідно до положень гірничої механіки, складаються з систем тріщин відриву – розсувів і відкритих тріщин сколювання – розривів типу скидо-зсувів, які закономірно орієнтуються під гострим кутом до осі загально-плитного стресу (рис. 2-5, 8-10) [1].

Прямими морфометричними діагностичними ознаками наявності у земній корі зон розтягу вважаються низинні ділянки рельєфу з підвищеною щільністю гідрографічної мережі [27]. Новітні зони розтягу структурно відбиваються у денному рельєфі формуванням просторово зближених та односпрямованих, видовжених субмеридіонально систем річкових долин. Ця морфометрична ознака яскраво проявляється в асиметричній будові щільної мережі крупних річок лівобережжя басейну Дніпра (Сула, Хорол, Псел, Ворскла, Оріль) (рис. 12, 13, жовті річкові долини). Характерною рисою будови гідрографічної мережі на цій території є розвинення припливів у цих річок лише з одного боку – зазвичай на схилах піднятого борту долини ріки. При цьому, уздовж лівих, східних берегів річок Пселі Ворскла та, навпаки, правого, західного берега ріки Сула сформувалися низки прибережних уступів-пагорбів заввишки у десятки метрів. Крайові височини цієї просторово сполученої гідрографічної системи, зі сходу та заходу обмежують широкую та розлогу низину у денному рельєфі. Ця новітня улоговина розташована у центральній частині Дніпровського грабена і вся заповнена щільною мережею інтенсивно меандрованих долин річок та їх припливів, зламаної, дугоподібної у плані морфології. Їх загальне північне простягання та збільшена відносна щільність проявляється у межах східної частини Лохвицького та західної частини Ізюмського сегментів і загалом збігається у просторі з площею поширення прогнозованих нами у земній корі за морфометричними (рис. 12, 13), геологічними (рис. 3, 4), тектонофізичними (рис. 3-5) діагностичними ознаками на цій території палеозападини новітніх зон розтягу.

Розлогі річкові долини розділяються вузькими, видовженими височинами, які займають структурну позицію уступів-шаблів, за якими східний та західний схили кайнозойської улоговини занурюються у напрямку її депоцентру. Найвиразнішою з новітніх позитивних структур є Приворсклянська височина, розташована над Ворсклянським виступом, проявленим у фундаменті і, частково, палеозойському структурному плані (рис. 17, цифра III). Він сформований у піднятому крилі Верховцівсько-Львівської зони глибинних розломів фундаменту, що територіально трасується на

меридіані м. Полтава (цифра 4 на рис. 6). Ворсклянський виступ у поверхні дорифейського фундаменту утворює структурний щабель, що розділяє сегменти західної частини палеозападини (Чернігівський і Лохвицький), де збереглася слабо деформована рифтова структура земної кори, і східної частини (Ізюмський сегмент і Західно-Донецький грабен), де вона інтенсивно деформована альпійськими рухами.

На більшості території ДДА палеозойські тектоніти зазвичай розташовуються у глибокому ерозійному зрізі під мезозойсько-кайнозойським платформним чохлам. У Західно-Донецькому грабені, де вони вивчені у природних відслоненнях, за системами палеозойських та кайнозойських тектонітів формуються зони катаклазування та брекчіювання осадових порід у розрізі різновікових стратиграфічних комплексів. Ці зони шириною у перші десятки метрів складені глинистими мілонітами та тектонічними брекчіями з уламками вміщуючих порід, рідше - бластокатаклазитами [20].

Дорифейські трансрегіональні коро-мантіїні розломи перетинають всю літосферу Сарматії товщиною 180-260 км, заглиблюючись у мантію до 100-200 км [28, 4]. На Українському щиті і Воронезькій антеклизі інструментальними методами встановлено і за даними дешифрування аерокосмознімків протрасовано в межах ДДА кілька їх меридіональних ре-активованих систем, які уперек, незгідно перетинають структуру рифтогенної палеозападини (рис. 6, 16, 17) [29].

Палеозойський скидовий каркас контролював формування лінійної структури палеорифту, а як частково ре-активований, також і умови син- і пострифтової басейнової седиментації у палеозападині. Через пострифтові підкидо-складчасті і покривно-насувні деформації рифтові скиди частково збереглися лише у північно-західній частині палео-западини (Західна мікроплита) і майже повністю зруйновані в її південно-східній частині (Східна мікроплита). Релікти скидо-розсувного каркасу розміщуються нерівномірно у сучасній інверсованій структурі дорифейського фундаменту ДДА (рис. 17). Найвиразніше проявлені фрагменти парних структурних ліній крайових порушень та прибортових і осьових магістральних систем тектонітів, за якими сформувалися найбільш амплітудні тектонічні щаблі-уступи, поздовжні до простягання Дніпровського грабена. На південному сході Ізюмського сегмента і в Західно-Донецькому грабені інтенсивність інверсійних деформацій рифтової структури була найбільшою. Скиди рифтового етапу тут зазнали ре-активації і здебільше були перетворені на підкиди, рідше простежуючись як реліктові фрагменти, на кшталт Красноріцького зонального скиду на

північному фланзі грабена (рис. 17, крайня права частина).

Магістральні рифтогенні системи тектонітів північно-західних азимутів простягання різко незгідно, ортогонально та діагонально, перетинаються зі зміщеннями по літералі системами дорифейських реверсних систем тектонітів меридіонального та північно-східного напрямків, ре-активованих як горизонтальні зсуви. За ними у структурі фундаменту сформувалися сім поперечних до його простягання лінійних зон горизонтально-зсувних деформацій. З північного заходу на південний схід це: Чернігівсько-Ніжинська, Глобино-Конотопська, Кобеляцько-Лебединська, Михайлівсько-Охтирська (центральна), Карлівсько-Чугуївська, Лозівсько-Старобільська, Добропільсько-Сватівська структурні зони (рис. 6, 17) [30]. Ці новітні трансформні зони займають структурну позицію новітніх між-сегментних кордонів ДДА.

Крім поперечних деформацій зі зміщеннями і дугоподібними викривленнями у плані за трансформними скидо-зсувними зонами, трасипарних крайових скидів перериваються пострифтовими плікативними дислокаціями. Лінії обох прибортових схилів Дніпровського грабена ускладнюють кілька ансамблів крупних сигмоїдальних горстових виступів фундаменту, сформованих за системами новітніх скидів. Уступи розділяються ланцюжками структурних заток на північному (Синівська, Валківська, Шевченківська) і південному (Городнянська, Лохвицька, Михайлівська) схилах Дніпровського грабена (рис. 11, 17).

Простягання більшості магістральних рифтогенних ліній у структурі дорифейського фундаменту і палеозойського комплексу приблизно збігаються у просторі Дніпровського грабена. Палеозойські тектоніти нерідко оновлюють лінії древніх тектонічних блоків, але частіше їх траси проходять паралельно зі зміщеннями, не збігаючись з ними, що встановлено на порівняльних тектонічних схемах (рис. 1, 6, 8, 16, 17). Натомість, у межах Західно-Донецького грабену, на західних схилах ДСС план інверсійних деформацій принципово інший: альпінотипні тектоніти використовують тут палеозойські лінії лише частково на локальних ділянках, здебільше перетинаючи їх під різними кутами.

Відмінності у просторових співвідношеннях тектонітів палеозойського та кайнозойського віку можуть бути обумовлені докорінними змінами геотектонічних умов збереженості/руйнування рифтового каркасу у напрямку з північного заходу на південний схід. Структурна і генетична диференціація тектонітів за простяганням авлакогена викликана тим, що з кінця мезозою – початку кайнозою різні сегменти палеозападини по-різному

реагували на загально плитні колізійні рухи через відмінності будови та зміни простягання осі грабена в їх межах (рис. 16, 17). Південно-західна частина (Чернігівський і Лохвицький сегменти), яка зберегла реліктову рифтову кору, ще й досі поводить як єдиний жорсткий блок (Західна мікроплита) і не піддається неотектонічній активізації у такому ступені як решта території. Натомість Ізюмський сегмент і Західно-Донецький грабен (Східна мікроплита), які мають стоншену кору океанічного типу без гранітного шару, зазнали значних неотектонічних деформацій.

Результати порівняльного аналізу азимутальної орієнтації та просторового розміщення рифтових і пострифтових систем тектонітів на теренах ДДА не підтверджують попередні уявлення про формування пострифтових систем тектонітів осадового чохла за напрямками рифтових ліній з успадкуванням генетичних типів палеозойської системи тектонітів [31,32]. З'ясовано, що ці окремі системи виникли у різних геодинамічних обстановках за протилежних напрямів орієнтування осі максимального стресу, тому відрізняються за генетичними типами складових систем тріщинуватості, кінематикою та вергентністю рухів геомас за ними. У палеозої при субширотному стиску формувалася переважно лівозсувний структурний ансамбль деформацій, а в кайнозої, в умовах субмеридіонального стиску – здебільше правозсувний. Про структурні прояви колізійних деформацій і кінематичні механізми формування інверсованої структури авлакогену більш розлого йдеться у наступній частині статті.

Таким чином, системи дорифейських тектонітів, ре-активовані у складі колізійного каркасу деформацій, частково успадковують напрями рифтової решітки і дорифтового стародавнього каркасу. Проте, так само, як кайнозойські тектоніти, вони складаються з «реверсного» типу розломів і змінюють свій вихідний генетичний тип і, відповідно, структурний прояв через зміну тектонічного режиму деформацій. У платформному рифтовому режимі вихідним типом розломів були скиди, скидо-зсуви та розсуви, натомість у режимі колізійного стресу вони перетворювалися на підкиди, насуви, зсуво-насуви і слугували каркасом інверсійних деформацій: тектонічних зривів у підвалині, складчастих і покривно-насувних дислокацій дорифейського фундаменту та фанерозойських комплексів осадового чохла.

Отримані результати порівняльного тектонічного аналізу свідчать, що тектоніти у зонах дорифейських глибинних розломів, які розмежовують древні геоблоки земної кори, ре-активувалися на неотектонічному етапі розвитку регіону не повсюдно та не на усьому своєму протязі, а їх інфраструктура (дрібні, непротижні розриви) не завжди

збігається з внутрішньою структурою розломів палеозою. До того ж ці тектоніти зазвичай ре-активувалися з протилежною кінематикою латеральних зміщень та іншою вергентністю рухів, що більшою мірою було пов'язано зі зміною напрямів дії зовнішніх сил.

На цих підставах зроблено такий загальний висновок: системи тектонітів різного віку та азимутальної орієнтації у земній корі ДДА складають тектонічні каркаси деформацій, динаміка і кінематика яких перманентно поновлювалася через ре-активацію давніх систем розломів шляхом формування «реверсних» систем у перемінному полі напружень.

Наукова новизна.

1. Результати порівняльного тектонічного аналізу різновікових систем тектонітів ДДА заперечують попередні уявлення, щодо прямого успадкування кайнозойськими системами тектонітів напрямів і генетичних типів палеозойських тектонітів рифтогенного каркасу. З'ясовано, що ці різновікові системи сформувалися у різних геодинамічних обстановках за протилежного напрямку орієнтування осі максимального стресу, тому відрізняються за генетичними типами тріщинуватості, кінематикою та вергентністю рухів геомас гірських порід за ними.

2. З'ясовано, що збігання загальних напрямів дорифейських систем тектонітів, ре-активованих у меридіональних напрямках, з мобільними зонами глибинних коро-мантіїних розломів фундаменту обумовлене тектонічною позицією останніх уздовж кордонів мегаблоків, що об'єдналися у ядрі Сарматії як акреційні терейни.

3. Показано, що перебудови інфраструктури рифтогенної палеозападини протягом фанерозойських епох тектоно-магматичної активізації відбувалися у перемінному полі тектонічних напруг шляхом змін генетичного типу, кінематики і вергентності рухів у ре-активованих системах розломів різного віку та азимутальних напрямків завдяки формуванню у них «реверсних» систем тектонітів, які складають молодші за віком тектонічні каркаси і контролюють нові плани деформацій.

4. Реконструйовано вихідні генетичні типи рифтогенних і ре-активованих у складі «реверсних» систем пострифтових тектонітів. У палеозої, в умовах меридіонального розтягу і широтного стиску кори Сарматії, сформувалася рифтогенний розломний каркас з магістральних скидо-розсувів та трансформних скидо-зсувів, натомість у кайнозої, в обстановці інтерференції загально-платформного меридіонального колізійного стресу і регіонального зсувного поля напруг утворився деформаційний підкидо-насувний, підкидо- та скидо- зсувний каркас.

5. Вперше встановлено загальні закономірності розміщення у структурі інверсованого авлакогену новітніх зон розтягу/стиску земної кори, пов'язаних з ділянками підвищеної щільності певних генетичних типів тектонітів і деформаційних парагенезів, які вони контролюють.

Висновки. З використанням оригінальної методики реконструкції напружено-деформованого стану земної кори і діагностики кінематичних механізмів розривних та складчастих деформацій земної кори на основі геоінформаційних технологій отримано наступні теоретичні висновки для пізнання закономірностей структурно-кінематичної еволюції земної кори Сарматії у складі кратонного ядра Східноєвропейської платформи.

1. Палеозойські динамічно спряжені магистральні системи тектонітів сучасного північно-західного простягання склали каркас девонського рифтового поясу. Наприкінці палеозою за їх напрямками сформувалися зближені паралельні лінії герцинської (заальська фаза) складчастості в інверсованому осадовому чохла Дніпровсько-Донецької палеозападини.

2. Інверсійні деформації рифтової структури контролювалися тектонічним каркасом, який складається з дорифейських і палеозойських систем розломів, ре-активованих у складі «реверсних» систем тектонітів інших генетичних типів, та новітніх систем кайнозойських тектонітів колізійного етапу. Обидва каркаси незгідно, ортогонально та діагонально накладалися на вихідну, лінійну рифтогенну решітку та сформовані за нею лінії герцинської складчастості.

3. У палеозої, в умовах меридіонального розтягу і широтного стиску кори Сарматії, сформувалася рифтова решітка скидо-розсувів та скидо-зсувів, натомість у кайнозої, в обстановці загально-плитного меридіонального колізійного стресу і регіональному горизонтально-зсувному

полі напруг утворився підкидо-насувний, підкидо- та скидо-зсувний каркас деформацій.

4. За комплексом діагностичних ознак встановлено загальні закономірності поширення у земній корі ДДА новітніх регіональних зон розтягу/стиску, пов'язаних з ділянками підвищеної щільності певних генетичних типів тектонітів і деформаційних парагенезів, що ними контролюються. Ділянки новітніх зон розтягу у межах авлакогену займають тектонічну позицію у центральній, зануреній частині палеозападини. Структурно у денному рельєфі вони відбиваються у формуванні просторово зближених та односпрямованих, видовженої меридіонально, територіально зближеної системи річкових долин лівобережжя басейну Дніпра, розташованих на північному схилі Придніпровської низини. Ділянки новітніх зон стиску земної кори яскраво відбиваються у формуванні новітніх підняттях у підшві кайнозою у південно-східній частині та палеозойських комплексах уздовж усього південного моноклінального схилу Дніпровського грабена. У палеозойському комплексі це розлогі структурні тераси, ускладнені лініями дрібної прирозломної ранньокайнозойської (ларамійської) складчастості. Найбільш яскраво та наочно структурні результати неотектонічних рухів відбиваються в формуванні сучасних вишин на кшталт Донецького кряжу, Приазовської височини та менших за розмірами позитивних форм рельєфу у межах Західно-Донецького грабена.

У наступній частині статті на підставі отриманих даних щодо просторового розподілу і структурної позиції пострифтових тектонічних каркасів деформацій розглядатимуться тектонічні режими деформацій і природні кінематичні механізми формування розривних та складчастих структурних парагенезів у межах новітніх зон розтягу/стискання земної кори у межах ДДА.

Список використаних джерел

1. Gzovsky M.V. (1975). *Fundamentals of tectonophysics*. M., Nauka, 536.
2. Chebanenko I.I. (1966). *Fault tectonics of Ukraine*. K., Nauk. Dumka, 178.
3. Chebanenko, I.I. (1977). *Theoretical aspects of tectonic divisibility of the earth's crust*. Kiev, Naukova Dumka.
4. Gintov, O. (2005). *Field tectonophysics and its application in the study of deformations of the earth's crust of Ukraine*. Kyiv, Phoenix.
5. Chikov, B.M. (2011). *Introduction to the physical foundations of static and dynamic geotectonics*. Sib. Dep. Rus. Acad. Sci., V. Sobolev Inst. Geol. Min. "Geo", Novos-k.
6. Timurziev A. (2009). *Recent shear tectonics of sedimentary basins: tectonophysical and fluiddynamic aspects (in connection with oil and gas content)*. Author's abstract. dis. Dr. of science g.-m. MSU, 40.
7. Woodcock J.T. (1986). *The role of strike-slip fault systems at plate boundaries*. Phil. Trans. R. Soc. London, 13-29.
8. Moody L., Hill M. (1956). *Wrench fault tectonic*. Bull. Geol. Soc. Amer., 64, 9, 1207.
9. Wilson J. T. (1965). *A new class of faults and their bearing on continental drift*. Nature, 207, 343-347.
10. Sylvester A. G. (1988). *Strike-slip faults*. Geol. Soc. Amer. Bull., 100, 1666-1703.
11. Bartashchuk O.V. (2021). *Geodynamic conditions of oil and gas bearing capacity of the Dnipro-Donetsk paleorift: Author's abstract. dis. Dr. geol. of science*. Kyiv, Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine, 33.

12. Барташук, О. (2024). Еволюція напружено-деформованого стану земної кори Дніпровсько-Донецького палеорифту у фанерозої. *Доповіді Національної академії наук України*, (3), 62–71. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2019.03.062>
13. Барташук, О. В. (2016). Системна організація диз'юнктивної тектоніки консолідованого фундаменту Дніпровсько-Донецького палеорифту. Частина 1. Лінеamenti. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»*, (45), 14–23. <https://periodicals.karazin.ua/geoeco/article/view/8176>
14. Rebetsky, Yu. (2002). Review of methods of reconstruction of tectonic stresses and increments of seismic-tectonic deformations. *Tectonics today*. M.: OIFZ RAN, 227–243.
15. Kruhlov S., Arsirii Yu., Velikanov V., Znamenska T., Lysak A., Lukin O., Shashkevych I., Popadiuk I., Radzivil A., Kholodnykh A. (2007). *Tectonic map of Ukraine. Scale 1: 1 000 000*. Ministry of Environmental Protection of Ukraine, State Geological Service. Ukrainian State Geological Exploration Institute. K.: UkrDHR.
16. *Map of Precambrian structural zoning of the southwestern part of the East European platform (1992). Scale 1:1,000,000. Ed. L.S. Galetsky. Set of maps "Geology and metallogeny of the southwestern part of the East European platform. Scale 1:1,000,000. Ed.-in-chief A.I. Zaritsky. K.: Goskormogeologiya, Geoprognoz, Tsentrgeologiya, PO "Belarus", VSEGEI, Voronezh state University.*
17. *Map of faults and main lineament zones of the southwest of the USSR (using space photography data) (1988). Scale 1:000 000. Ed. N. Krylov. M., USSR Ministry of Geology, 4.*
18. Сканована карта річок і річкових басейнів України. Інтернет ресурс: <https://megaobzor.net/gidrografiya-ukrayiny-karta-richok/>
19. Goryainov S. (1999). On the Alpine complication of the geological structure in different regions of Ukraine. *Supplement of the NAS of Ukraine*, 8, 106–111.
20. Goryainov S., Denysenko D., Divitsky O. (1997). *Metamorphic and metasomatic complexes of the Middle Buzhye*. Kharkiv State University, Kharkiv, 225.
21. Glushko V. (ed.) (1978). *Deep geological sections of the Dnieper-Donets basin (in connection with oil and gas prospects). Explanatory note to geological maps of VAT on sections 5000 and 6000 m on a scale of 1:500,000*. Kyiv: UKRNIIGAZ, UKRNIIGRY, 88, 2 maps.
22. Jenness J., 2014. Polar Plots for ArcGIS. Jenness Enterprises. Available at: http://www.jennessent.com/arcgis/Polar_Plots.htm
23. Барташук О.В. (2017). Системна організація диз'юнктивної тектоніки консолідованого фундаменту Дніпровсько-Донецького палеорифту. Частина 2. Лінійні зони горизонтально-здвигових дислокацій рифтового етапу. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»*, (47), 7–17. <https://periodicals.karazin.ua/geoeco/article/view/10324>
24. Горайнов, С. (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>
25. Барташук, О., Суярко, В., Чусько, О., & Перрі, Б. Д. (2024). Тектонічна еволюція внутрішньоплитних структур Сарматії у фанерозої. 1. Структурно-речовинна диференціація літосфери і тектонічна подільність земної кори за геофізичними даними. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»*, (60), 12–27. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-01>
26. Atmaoui N., Kukowski N., Stockhert B., Konig D. (2006). Initiation and development of pull-apart basins with Riedel shear mechanism: insights from scaled clay experiments. *Int. J. Earth Sci. (Geol Rundsch.)*, 95, 225–28.
27. Stelmakh V. Yu., Melniychuk M. M. (2022). *Hydrography of Ukraine: lecture notes. Methodological development for students of the Faculty of Geography*. Lutsk, 121.
28. *Geology and oil and gas capacity of the Dnieper-Donets Basin. Deep faults and combined oil and gas traps (1991). Ed. V. K. Gavrish: Naukova dumka, 172.*
29. Chebanenko I., Znamenskaya T., Shatalov N. (1991). Manifestations of strike-slip tectonics in the structure of the lithosphere of Ukraine. *Strike-slip tectonics dislocations and their role in the formation of minerals*. M.: Nauka, 85–91.
30. Bartashchuk O.V., Suyarko V. G. (2018). Horizontally displaced of geomasses in the continental rift structures (on the example of the Dnipro-Donetsk paleorift). Part 1. Structural manifestations of tectonic flows in basement. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"* (49), 10–23. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2018-49-01> [in Ukrainian].
31. Stovba S. N. (2008). *Geodynamic evolution of the Dnieper-Donetsk Basin and Donbass: Author's abstract. dis. Dr. Geol. of science*. Kyiv: NII Oil and gas industry (SE Naukanoftogaz), 495.
32. *Geology and oil and gas capacity of the Dnieper-Donets Basin. Deep structure and geotectonic development (1989). Ed. V. K. Gavrish. K.: Naukova dumka, 208.*

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Tectonic Evolution of the Intra-plate Structures of Sarmatia in the Phanerozoic. 2. Tectonic frameworks of deformations

Oleksii Bartaschuk ¹

DSc (Geology), Professor of the Department of Fundamental and Applied Geology

¹ V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine;

Vasyl Suyarko ¹

DSc (Geology and Mineralogy), Professor,

Department of Fundamental and Applied Geology;

Oleksandr Chuienko ¹,

Head of laboratory for the study of rocks, minerals and fossil organisms

ABSTRACT

Objective. Based on data from the Dnieper-Donetsk Aulacogene, the role of different-age systems of crustal faults as tectonic frameworks of deformations of the Sarmatian plate was investigated.

Methods. An integrated method for reconstructing the stress-strain state of the crust was proposed based on geoinformation technologies, morphometric, tectonophysical methods, and comparative structural analysis of discontinuous and folded deformations.

Results. Four main fault systems were identified in the pre-Rifean basement and Phanerozoic sedimentary cover of the Aulacogene. There are pre-Rifean cratonic, Paleozoic riftogenic, and two post-rift systems of early (Laramian phase, Senonian-Early Eocene) and recent (Attic phase, Neogene-Quarter) Cenozoic activation. It is established that Paleozoic tectonites formed a riftogenic lattice and a framework of the Hercynian (Zaalian phase) folding of the Dnieper Graben cover. It is found that the inversion deformations of the Aulacogene are controlled by the frameworks of reactivated pre-Rifean and Cenozoic tectonites, which are unconformably superimposed on rift lines. Previous ideas about the direct reactivation of the latest tectonites with the inheritance of the directions and genetic types of Paleozoic tectonites were not confirmed. The coincidence of the directions of the latest tectonic systems, reactivated in meridional directions, with the suture zones of the basement is due to their position on the moving boundaries of megablocks, which united in the core of Sarmatia as accretionary terranes. The original and reactivated genetic types of "reverse" tectonites were reconstructed: in the Paleozoic, under conditions of meridional stress and latitudinal extension of the Sarmatian crust, a thrust-shear rift framework was formed, while in the Cenozoic, a thrust-shear framework was formed in a regional shear field.

Scientific novelty. The kinematic mechanism of the natural phenomenon of spatiotemporal inversion of stress field parameters was determined. Geodynamic axes in the Phanerozoic underwent a counterclockwise shift of $\sim 15^\circ$ during the tectogenesis epoch, which caused their general displacement from the Paleozoic to the Cenozoic by $\sim 60^\circ$. Because of this, four deformation planes were formed in the Sarmatian crust: rift (D–C1), inversion (C2–P1), two collisional (T–K1) and (K2–KZ). The distribution patterns of the latest tension/compression zones in the aulacogen in areas of increased density of certain genetic types of tectonites and deformation parageneses have been established.

Conclusion. A theoretical conclusion has been obtained for understanding the patterns of formation and evolution of the Earth's crust: the restructuring of the platform infrastructure occurs in a variable stress field due to changes in the genetic type and kinematics of tectonites with the formation of "reverse" reactivated systems that constitute younger tectonic deformation frameworks.

Practical significance. The application of the original method of reconstruction of the stress-strain state of the Earth's crust made it possible to identify tectonic modes and kinematic mechanisms of fault and fold deformations of the Earth's crust in Sarmatia.

Keywords: Dnieper-Donetsk aulacogen; geoinformation technologies, morphometric and tectonophysical analyses; pre-Ryphean, Paleozoic, Cenozoic tectonic systems; "reverse" faults; tectonic frameworks of deformations.

References

1. Gzovsky M.V. (1975). *Fundamentals of tectonophysics*. M., Nauka, 536.
2. Chebanenko I.I. (1966). *Fault tectonics of Ukraine*. K., Nauk. Dumka, 178.
3. Chebanenko, I.I. (1977). *Theoretical aspects of tectonic divisibility of the earth's crust*. Kiev, Naukova Dumka.
4. Gintov, O. (2005). *Field tectonophysics and its application in the study of deformations of the earth's crust of Ukraine*. Kyiv, Phoenix.
5. Chikov, B.M. (2011). *Introduction to the physical foundations of static and dynamic geotectonics*. Sib. Dep. Rus. Acad. Sci., V. Sobolev Inst. Geol. Min. "Geo", Novos-k.
6. Timurziev A. (2009). *Recent shear tectonics of sedimentary basins: tectonophysical and fluiddynamic aspects (in connection with oil and gas content)*. Author's abstract. dis. Dr. g.-m. of science. MSU, 40.
7. Woodcock J.T. (1986). *The role of strike-slip fault systems at plate boundaries*. Phil. Trans. R. Soc. London, 13-29.
8. Moody L., Hill M. (1956). *Wrench fault tectonic*. Bull. Geol. Soc. Amer., 64, 9, 1207.
9. Wilson J. T. (1965). *A new class of faults and their bearing on continental drift*. Nature, 207, 343-347.
10. Sylvester A. G. (1988). *Strike-slip faults*. Geol. Soc. Amer. Bull., 100, 1666-1703.

11. Bartashchuk O.V. (2021). *Geodynamic conditions of oil and gas bearing capacity of the Dnipro-Donetsk paleorift: Author's abstract. dis. Dr. geol. of science*. Kyiv, Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine, 33.
12. Bartashchuk, O. (2024). Phanerozoic evolution model of a stress strain state of the Earth crust at the Dnieper-Donets paleorift. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, (3), 62–71. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2019.03.062> [in Ukrainian].
13. Bartashchuk, O. V. (2016). System organization of consolidated basement's disjunctive tectonics in Dnipro-Donets paleorift. Part 1. Lineaments. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*, (45), 14-23. Available at <https://periodicals.karazin.ua/geoeco/article/view/8176> [in Ukrainian]
14. Rebetsky, Yu. (2002). Review of methods of reconstruction of tectonic stresses and increments of seismic-tectonic deformations. *Tectonics today*. M.: OIFZ RAN, 227-243.
15. Kruhlov S., Arsirii Yu., Velikanov V., Znamenska T., Lysak A., Lukin O., Shashkevych I., Popadiuk I., Radzivil A., Kholodnykh A. (2007). *Tectonic map of Ukraine*. Scale 1: 1 000 000. Ministry of Environmental Protection of Ukraine, State Geological Service. Ukrainian State Geological Exploration Institute. K.: UkrDHRI.
16. *Map of Precambrian structural zoning of the southwestern part of the East European platform (1992)*. Scale 1:1,000,000. Ed. L.S. Galetsky. Set of maps "Geology and metallogeny of the southwestern part of the East European platform. Scale 1:1,000,000. Ed.-in-chief A.I. Zaritsky. K.: Goskossmogeologiya, Geoprognoz, Tsentrgeologiya, PO "Belarus", VSEGEI, Voronezh state University.
17. *Map of faults and main lineament zones of the southwest of the USSR (using space photography data) (1988)*. Scale 1:000 000. Ed. N. Krylov. M., USSR Ministry of Geology, 4.
18. Scanned map of rivers and river basins of Ukraine. Available at: <https://megaobzor.net/gidrografiya-ukrayiny-karta-richok/>
19. Goryainov S. (1999). On the Alpine complication of the geological structure in different regions of Ukraine. *Supplement of the NAS of Ukraine*, 8, 106-111.
20. Goryainov S., Denysenko D., Divitsky O. (1997). *Metamorphic and metasomatic complexes of the Middle Buzhhe*. Kharkiv State University, Kharkiv, 225.
21. Glushko V. (ed.) (1978). *Deep geological sections of the Dnieper-Donets basin (in connection with oil and gas prospects)*. Explanatory note to geological maps of VAT on sections 5000 and 6000 m on a scale of 1:500,000. Kyiv: UKRNIIGAZ, UKRNIIGRY, 88, 2 maps.
22. Jenness J., 2014. *Polar Plots for ArcGIS*. Jenness Enterprises. Available at: http://www.jennessent.com/arcgis/Polar_Plots.htm
23. Bartashchuk O.V. (2017). System organization of disjunctive tectonics in consolidated basement of Dnipro-Donets paleorift. Part 2. Linear zones of horizontal-shear dislocation at rifting stage. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv University, series "Geology. Geography. Ecology"*, 47, 7-17. [in Ukrainian]
24. Goryainov, S. (2022). Alpine tectonic movements and salt tectonics of Eastern Ukraine. *Visnyk of 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]
25. Bartaschuk Oleksii, Suyarko Vasyl, Chuienko Oleksandr, Perry Bruce J. (2024). Tectonic Evolution of the Intra-plate Structures of Sarmatia in the Phanerozoic. 1. Geophysical analysis of structural and substance differentiation of the lithosphere and tectonic divisibility of the Earth's crust. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (60), 12-27. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-01> [in Ukrainian]
26. Atmaoui N., Kukowski N., Stockhert B., Konig D. (2006). Initiation and development of pull-apart basins with Riedel shear mechanism: insights from scaled clay experiments. *Int. J. Earth Sci. (Geol Rundsch.)*, 95, 225–28.
27. Stelmakh V. Yu., Melniychuk M. M. (2022). *Hydrography of Ukraine: lecture notes. Methodological development for students of the Faculty of Geography*. Lutsk, 121.
28. *Geology and oil and gas capacity of the Dnieper-Donets Basin. Deep faults and combined oil and gas traps (1991)*. Ed. V. K. Gavrish. Naukova dumka, 172.
29. Chebanenko I., Znamenskaya T., Shatalov N. (1991). Manifestations of strike-slip tectonics in the structure of the lithosphere of Ukraine. *Strike-slip tectonics dislocations and their role in the formation of minerals*. M.: Nauka, 85-91.
30. Bartashchuk O.V., Suyarko V. G. (2018). Horizontally displaced of geomasses in the continental rift structures (on the example of the Dnipro-Donetsk paleorift). Part 1. Structural manifestations of tectonic flows in basement. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"* (49), 10-23. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2018-49-01> [in Ukrainian].
31. Stovba S. N. (2008). *Geodynamic evolution of the Dnieper-Donetsk Basin and Donbass: Author's abstract. dis. Dr. Geol. of science*. Kyiv: NII Oil and gas industry (SE Naukanoftogaz), 495.
32. *Geology and oil and gas capacity of the Dnieper-Donets Basin. Deep structure and geotectonic development (1989)*. Ed. V. K. Gavrish. K.: Naukova dumka, 208.

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 22February 2025

Accepted 12 April 2025

До питання про місцеві стратиграфічні підрозділи крейдових відкладів українського сектора північно-західного шельфу Чорного моря. Стаття 1. Нижня крейда

Ігор Іщенко¹

д. геол. н., головний фахівець відділу регіональних геологічних досліджень,

¹ Київське відділення Українського науково-дослідного інституту природних газів, Київ, Україна,

e-mail: igor.ishchenko@ugv.com.ua,  <http://orcid.org/0009-0002-3174-7978>;

Леонід Якушин²

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>

Стратиграфічні схеми нижньо- та верхньокрейдових відкладів північно-західного шельфу Чорного моря, затверджені Національним стратиграфічним комітетом України у 2013 році побудовано виключно за біо- та літостратиграфічним методом. Місцеві стратиграфічні підрозділи на цих схемах виділено тільки в ранзі товщ. Враховуючи низький відсоток виносу кернового матеріалу при бурінні морських глибоких свердловин, стратифікація цього регіону потребує залучення додаткових методів розчленування та кореляції гірських порід з метою виділення світ – основних таксономічних одиниць місцевих стратиграфічних підрозділів і основних картувальних одиниць регіональної (басейнової) стратиграфії при велико-середньомасштабній зйомці, геологопошукових та геолого-розвідувальних роботах. Авторами статті, за комплексом методів на геофізичній основі (каротаж) з урахуванням результатів регіональних сейсмічних досліджень, палеонтологічних визначень відносного геологічного віку порід, літературних та фондових матеріалів у нижньокрейдовому розрізі українського сектора північно-західного шельфу Чорного моря проведено ревізію місцевих стратиграфічних підрозділів (товщ), що увійшли до стратиграфічної схеми 2013 року, а також місцевих стратиграфічних підрозділів у ранзі світ, виділених авторами статті у 2015 році. За результатами досліджень альбеські відклади пропонується виділяти у складі тендрівської (вперше) та євпаторійської світ. Тендрівська світа від назви Тендрівської коси на північно-західному шельфі Чорного моря, що на узбережжі Херсонської області. Виділяється вперше. Раніше виділялася як товща. Стратотип – розріз свердловини Тендрівська-19 в інтервалі глибин 2626-2500 м, встановлений за геофізичними даними (ГДС). Розповсюджена в межах Південноукраїнської монокліналі. Складена карбонатними породами. Товщина відкладів 230 м. Євпаторійська світа від назви структури на Каламітському піднятті, що на північно-західному шельфі Чорного моря. Раніше виділялася як каламітська світа. Стратотип – розріз свердловини Євпаторійська-2 в інтервалі глибин 560-1060 м, встановлений за ГДС. Розповсюджена на акваторії північно-західного шельфу Чорного моря в межах Скіфської плити. Складена переважно силікатними породами. Товщин відкладів 500 м. Розрізи світ, що пропонуються до уваги, супроводжуються геолого-геофізичними планшетами, побудованими І.І. Іщенко під час роботи в ДП «Науканафтогаз».

Ключові слова: стратиграфія, нижньокрейдові відклади, 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 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>

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 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]

Вступ. Успішність геологорозвідувальних робіт багато в чому залежить від правильної стратиграфічної ідентифікації гірських порід. Особливого значення це набуває при встановленні геологічного віку осадових утворень закритих басейнів. Нажаль, в Стратиграфічному кодексі України відсутні Правила виділення та опису стратиграфічних підрозділів в розрізах свердловин, а лише зазначається можливість їх виділення [1]. І тому при їх документації (виділенні, описі чи під час створення стратиграфічних схем) дослідник стикається з певними труднощами, пов'язаними з особливостями стратиграфічного розчленування осадових товщ похованих басейнів. У такому разі комплексне застосування усіх наявних стратиграфічних методів стає обов'язковим.

Згідно із схемою стратиграфії крейдових відкладів північно-західного шельфу Чорного моря, затвердженою Національним стратиграфічним комітетом України у 2013 році в межах досліджуваного регіону у якості місцевих стратиграфічних підрозділів виділено тільки товщі: шість для нижньої крейди та сім для верхньої [2]. Виділення на ній допоміжних таксономічних та картувальних одиниць місцевих стратиграфічних підрозділів пояснюється застосуванням тільки біо- та літостратиграфічних методів, що при недостатній розбуреності шельфу, незначному відсотку виносу кернового матеріалу, без врахування геофізичних, сейсмічних досліджень та інших чинників, значно обмежує можливості стратиграфії.

В цьому аспекті тільки застосування систем-

ного стратиграфічного аналізу, ґрунтованого на використанні фактологічних даних сприятиме вирішенню головних задач стратиграфічних досліджень [3].

Одним з таких завдань є уточнення та деталізація існуючих стратиграфічних схем крейдових відкладів північно-західного шельфу Чорного моря, які є нафтогазоносними.

Незважаючи на значну кількість палеонтологічних, літологічних, стратиграфічних, геофізичних та сейсмічних робіт, проведених на північно-західному шельфі Чорного моря, стратиграфія крейдових відкладів цього регіону потребує подальшого вдосконалення і, перш за все, в частині валідності виділення місцевих стратиграфічних підрозділів.

Отже, виділення світ, основних картувальних одиниць в регіональній (басейновій) стратиграфії при геологічній зйомці, геолого-пошукових та геолого-розвідувальних роботах для крейдових відкладів північно-західного шельфу Чорного моря, на сьогодні є не вирішеним та актуальним.

Мета дослідження. За комплексом геологічних методів провести ревізію місцевих стратиграфічних підрозділів крейдових відкладів українського сектора північно-західного шельфу Чорного моря, запропонованих колективом авторів у 2013 році [2], а також переглянути, власні пропозиції щодо стратиграфії цього регіону [4,5], які не увійшли до стратиграфічних схем 2013 року.

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

Предмет дослідження. Стратиграфія та світний поділ означених відкладів.

Отримані авторами в ході досліджень результати заплановано висвітлити у двох публікаціях. Перша з них буде присвячена виділенню та характеристиці місцевих стратиграфічних підрозділів у нижньокрейдових, а друга – верхньокрейдових відкладах досліджуваного регіону.

Структурні підрозділи «Вступ» та «Аналіз останніх досліджень та публікацій» загальні для обох статей.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. З початком інтенсивного розбурювання на початку 70 років минулого сторіччя північно-західного шельфу Чорного моря на нафту та газ з'являються перші публікації палеонтологічного, стратиграфічного, палеогеографічного спрямування, присвячені визначенню відносного геологічного віку порід, кореляції одновікових осадових утворень, з'ясуванню умов осадконакопичення та палеогеографічним реконструкціям крейдового періоду [6,7].

Першим фундаментальним узагальненням отриманих результатів геолого-розвідувальних

робіт стала колективна монографія [8], де наведено літологічну, палеонтологічну та біостратиграфічну характеристику регіональних, місцевих та допоміжних стратиграфічних підрозділів крейдової системи північно-західного шельфу Чорного моря та його узбережжя; здійснено їх розчленування за біостратиграфічним методом та кореляцію з підрозділами загальної стратиграфічної шкали; наведено інформацію про їх літологічні особливості та розповсюдження на території дослідження.

Нажаль, подальші роботи з біо-літостратиграфії крейдових відкладів північно-західного шельфу Чорного моря разом з узагальненням матеріалів попередніх досліджень не знайшли свого відображення у комплекті стратиграфічних схем фанерозойських утворень України для геологічних карт нового покоління, виданих у 1993 році.

З набуттям Україною незалежності північно-західний шельф Чорного моря розглядається, як регіон зі значними запасами вуглеводнів. В його межах проводиться великий об'єм геолого-пошукових робіт.

Результати зі стратиграфії та палеонтології крейдових відкладів цього складного за геологічною будовою та перспективного на вуглеводні регіону України відображено у монографіях, наукових статтях, тезах, дисертаційних роботах і звітах про виконання науково-дослідних робіт [2, 5, 8-17 та ін.]. Вони стали основою для побудови сучасних стратиграфічних схем досліджуваного регіону [2, 14], розуміння особливостей його геологічної будови та підвищення достовірності прогнозу нафтогазоносності [15; 18-24 та ін.].

На сьогодні, валідними стратиграфічними схемами крейдових відкладів північно-західного шельфу Чорного моря є схеми, що увійшли до першого тому колективної монографії «Стратиграфія верхнього протерозою та фанерозою України» під редакцією П.Ф. Гожики [2] і затверджені Стратиграфічним комітетом України.

Матеріал та методи дослідження. Проаналізовано матеріали буріння 10 глибоких свердловин, що розкрили нижньокрейдові відклади північно-західного шельфу Чорного моря та 10 свердловин прилеглої суходолу (рис. 1), новітні дані сейсмозондувальних робіт та результати 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».

У якості опорних свердловин обрані такі, розрізи яких за комплексом геологічних чинників (палеонтологічні визначення викопних груп фауни для встановлення відносного геологічного

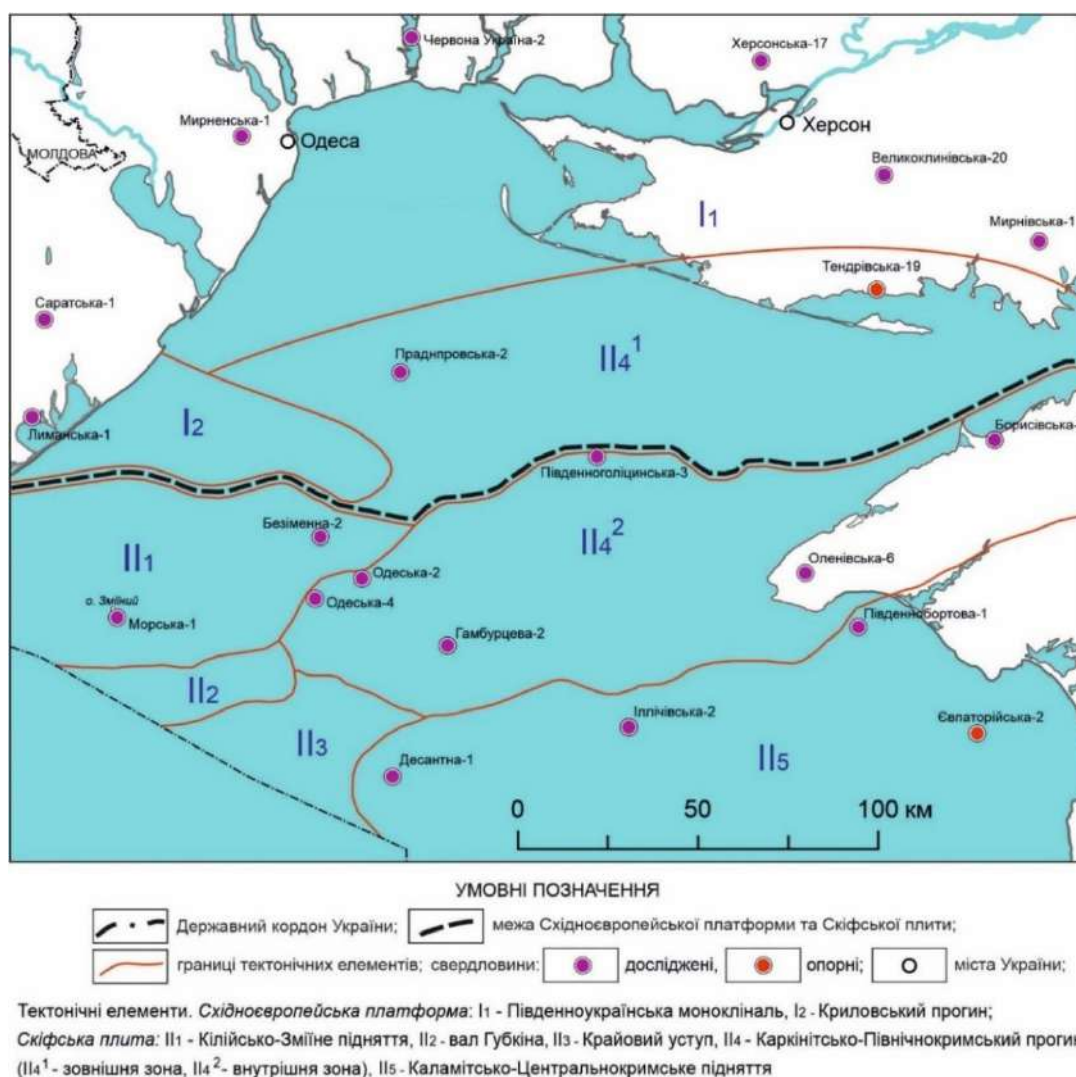


Рис. 1. Карта-схема території дослідження / Fig. 1. Map of the study area

віку порід, літологічний опис кам'яного матеріалу, геофізичні дослідження свердловин тощо) найбільш інформативні для стратиграфічних побудов.

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

В статті використано тектонічне районування північно-західного шельфу Чорного моря за [15].

Виклад основного матеріалу дослідження.

Відклади крейдової системи розповсюджені по всій акваторії північно-західного шельфу Чорного моря. Вони представлені карбонатними (вапняками, мергелями), силікатними (пісками, пісковиками, алевролітами, аргілітами, глинами) та вулканогенно-осадочними породами (туфами, туфитами, туфопісковиками).

Крейдові відклади з переривом залягають на докембрійських, палеозойських (?) та тріас-юрських (?) і перекриваються палеогеновими чи більш молодими утвореннями. Виділяються у складі нижнього та верхнього відділів.

Розкрита товщина відкладів більше 2000 м.

Нижній відділ крейдової системи.

Відклади нижнього відділу крейдової системи встановлено у розрізах 10 свердловин на площах: Безіменній, Гамбурцева, Десантній, Євпаторійській, Іллічівській, Одеській, Південнобортівській, Південногіліцинській та Прадніпровській і характеризуються карбонатно-теригенно-глинистим літологічним типом розрізу.

Відклади узгоджено чи з переривом залягають на докембрійських, палеозойських (?) та тріас-юрських (?) і перекриваються утвореннями верхньої крейди.

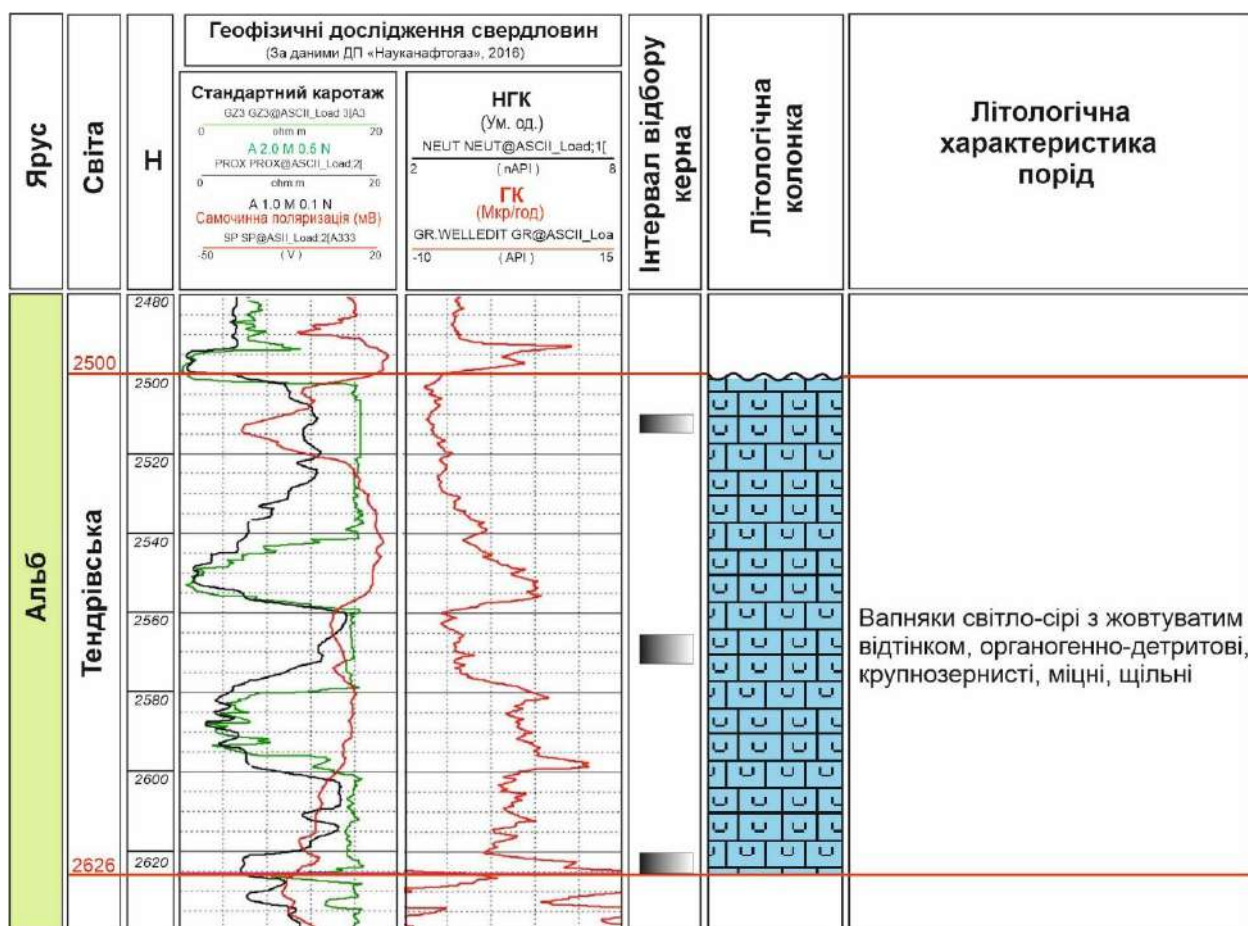
Виділяються у складі альбського ярусу.

Розкрита товщина відкладів близько 1000 м.

За результатами досліджень альбські відклади виділяються у складі тендрівської (вперше) та євпаторійської світ.

Альб.

Тендрівська світ (K_{1ten}) від назви Тендрівської коси на північно-західному шельфі Чорного моря, що на узбережжі Херсонської області. Виділяється вперше. Раніше виділялась як товща [2, 8; 25]. Стратотип – розріз св. Тендрівська-19 в



УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ ДО РИС. 2,3:

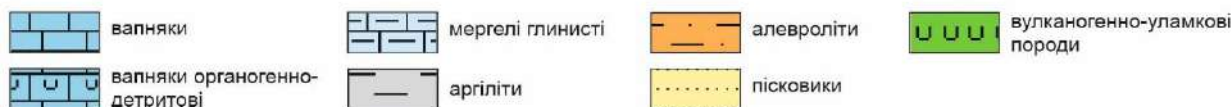


Рис. 2. Стратотип тендрівської світи / Fig. 2. Stratotype of the Tendrivska Formation

інтервалі глибин 2626-2500 м, встановлений за ГДС (рис. 2). Розповсюджена в межах Південно-української монокліналі між Тилігульським лиманом та Тендрівською косою. Складена вапняками світло-сірими з жовтуватим відтінком, органогенно-детритовими, крупнозернистими, міцними, щільними. Залягає зі стратиграфічним переривом на аргілітах та глинах аргілітоподібних з прошарками алевролітів та пісковиків середнього, верхнього альбу чи континентальних відкладах нижнього апту та перекривається з переривом піщано-глинистими з прошарками вапняків відкладами сеноману. Границі світи чітко фіксуються на електрокаротажних діаграмах та за іншими видами каротажу.

Товщина відкладів до 230 м.

Датована пізнім альбом за форамініферами *Paraphillum primaevum* Lemolne, *Rotalipora apenninica* (Renz.), *R. ticinensis* (Gand.) [14].

Об'єднує червоноукраїнську, великоклинівську та тендрівську товщі [2].

Євпаторійська світа (К₁евр) від назви струк-

тури Євпаторійська на Каламітському піднятті, що на північно-західному шельфі Чорного моря. Раніше каламітська світа [5]. Назву змінено через преокупацію. Стратотип – розріз св. Євпаторійська-2 в інтервалі глибин 560-1060 м, встановлений за ГДС (рис. 3). Розповсюджена в межах вала Губкіна, Кілійсько-Зміїного підняття, у Каркінітському прогині, на Каламітському піднятті та Крайовому уступі. Складена аргілітами темно-сірими до чорних алевритистими, пісковиками та алевролітами з прошарками вулканогенно-уламкових порід, пісковиків, вапняків та мергелів глинистих. Залягає зі стратиграфічним переривом на теригенно-глинистих сильно метаморфизованих утвореннях середнього тріасу та перекривається з ерозійним контактом глинисто-піщанистими відкладами раннього сеноману. Границі світи чітко фіксуються на електрокаротажних діаграмах та за іншими видами каротажу за зміною літологічного складу порід.

Товщина відкладів до 2750 м.

Датована альбом за форамініферами *Hedbergella*

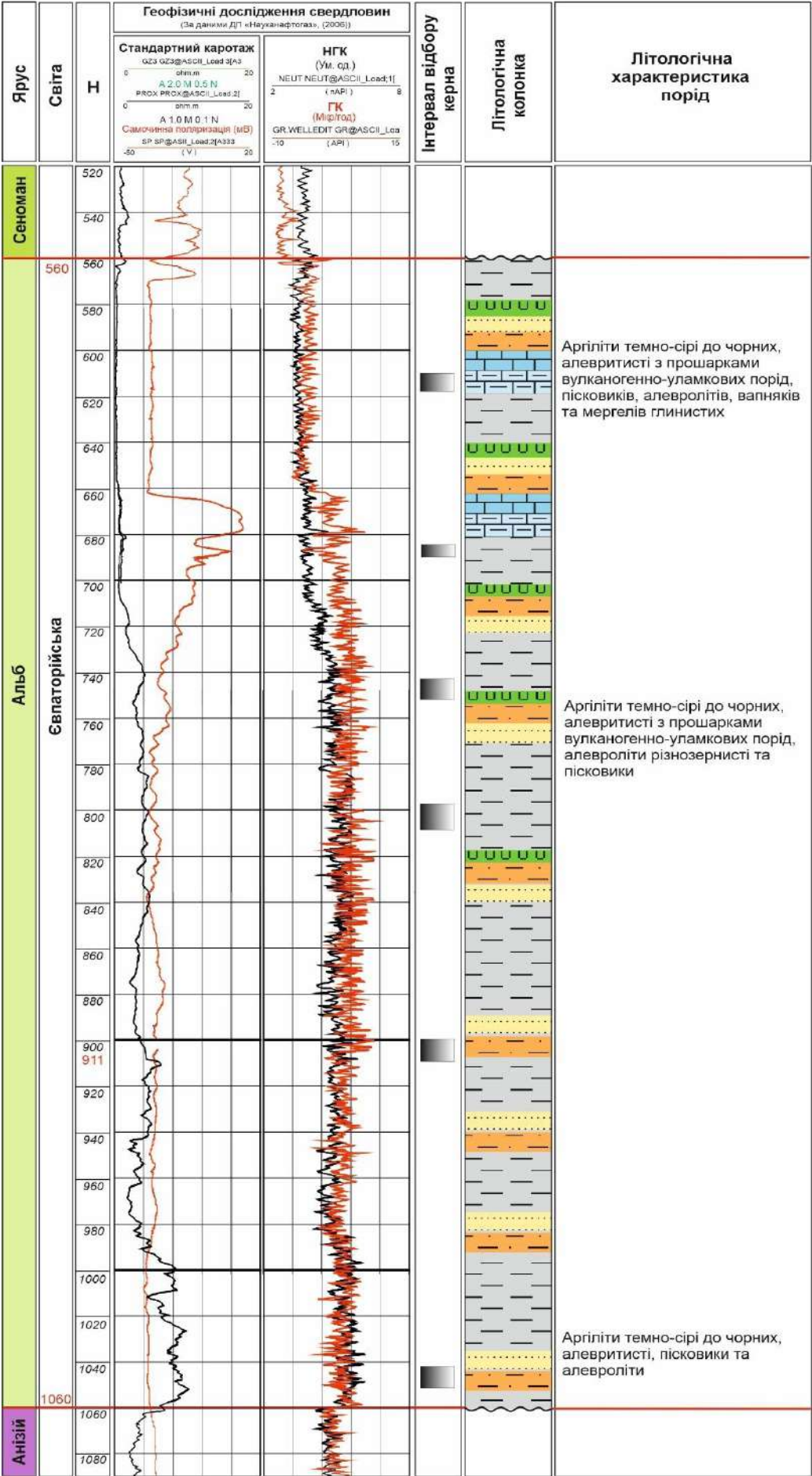


Рис. 3. Стратотип євпаторійської світи / Fig. 3. Stratotype of the Yevpatoriyska Formation

gella infracretacea (Glaessn.), *H. planispira* (Tappan), *Rotalipora appenninica* (Renz.), *R. ticinensis* (Gand.), *Haplophragmoides rosaceus* Subb., *H. nonioninoides* Rss., *Trochogaudryina filiformis* (Berth.), *Gavelinella infracretacea* Moroz., *G. biinvoluta* Mjatl., *Gyroidina kasahstanica* Mjatl., *G. infracretacea* Moroz., *G. biinvoluta* Mjatl., *Hedbergella globigerinellinoides* (Subb.) та ін. [2, 8, 14].

Включає верхню частину олімпійської товщі, десантну, іллічівську та безіменну товщі [2].

Висновки. Проведено ревізію місцевих стратиграфічних підрозділів нижньокрейдових відкладів українського сектора північно-західного шельфу Чорного моря, що увійшли до стратиграфічної схеми 2013 року [2], а також, виділених авторами статті у 2015 році [5].

За комплексом методів на геофізичній основі (каротаж) з урахуванням результатів регіональних сейсмічних досліджень, палеонтологічних визначень відносного геологічного віку порід, літературних та фондових матеріалів у нижньокрейдовому розрізі північно-західного шельфу Чорного моря виділено місцеві стратиграфічні підрозділи у ранзі світ на відміну від стратиграфіч-

них підрозділів (товщ), що увійшли до стратиграфічної схеми 2013 року.

Альбські відклади пропонується виділяти у складі тендрівської (вперше) та євпаторійської світ.

Розрізи світ, що пропонуються до уваги, супроводжуються геолого-геофізичними планшетами.

Отримані результати увійдуть до Пояснювальної записки до стратиграфічної схеми крейдових відкладів північно-західного шельфу Чорного моря для подальшого розгляду її на засіданні постійних комісій Національного Стратиграфічного Комітету України.

Подяка. В статті висвітлено результати робіт за темами: «Стратегічна мінеральна сировина для відновлення економіки України: аналіз ресурсів та запасів, розробка критеріїв пошуку для нарощування їх мінерально-сировинної бази» (ДР № 6541230) та «Біостратиграфія мезо-кайнозойських відкладів нафтогазоносних регіонів України як фундаментальна базова основа системного забезпечення геологічних робіт» (ДР № 0122U001604), які виконувались в ІГН НАН України протягом 2022-2025 років.

Список використаних джерел

1. Гожик, П. Ф. (ред.) (2012). *Стратиграфічний кодекс України* (2-е вид.). Київ.
2. Гожик, П. Ф. (ред.) (2013). *Стратиграфія верхнього протерозою та фанерозою України. Т. 1. Стратиграфія верхнього протерозою, палеозою та мезозою України*. Київ: Логос.
3. Маслун, Н. В., Жабіна, Н. М., Іванік, М. М., Вага, Д. Д., Супрун, І. С. (2020). *Стратиграфічні критерії прогнозування покладів вуглеводнів в мезо-кайнозойських формаціях України: матеріали Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми гірничої геології та геоecології»* (с. 66-70). 10-11 грудня, 2020, Україна: ДУ НЦ ГТГРІ НАН України.
4. Якушин, Л., Ищенко, И. (2013). *Стратиграфия мезозойских отложений Одесского шельфа Черного моря: материалы IV Международной. научно-технической конференции «Геология и углеводородный потенциал Балкано-Черноморского региона»* (с. 57-63). 11-15 сентября, 2013, Варна, Болгария.
5. Ищенко, И. И., Якушин, Л. Н. (2015). *Местные стратиграфические подразделения меловых отложений северо-западного шельфа Черного моря. Проблемы нефтегазовой промышленности*, (11-12), 85-98.
6. Менкес, М. А., Волошина, Г. М. (1975). *Мікропалеонтологічна характеристика еоценових, палеоценових та верхньокрейдових відкладів морської Голіцинської свердловини. Доклади АН УРСР, Б* (10), 888-891.
7. Плотнікова, Л. Ф., Люльева, С. А. (1977). *Новые материалы к стратиграфическому расчленению верхнемеловых отложений северо-западного шельфа Чёрного моря. Доклады АН УССР, Б* (1), 21-24.
8. Тесленко Ю. В. (ред.) (1984). *Геология шельфа УССР. Стратиграфия (шельф и побережья Чёрного моря)*. Київ: Наук. думка.
9. Плотнікова, Л. Ф. (2000). *К стратиграфии меловых отложений северо-западного шельфа Чёрного моря. Биостратиграфические и палеоэкологические аспекты событийной стратиграфии*. Київ: ІГН НАНУ, 32-33.
10. Шумник, А. В. (2001). *Біостратиграфія верхньокрейдових відкладів північно-західного шельфу Чорного моря і кримського континентального схилу за нанофосіліями. Геологічний журнал*, (3), 96-105.
11. Плотнікова, Л. Ф., Маслун, Н. В., Іванік, М. М., Цихоцька, Н. Н., Шумник, А. В. (2003). *Стратиграфія крейдово-палеоценових відкладів та особливості геологічного розвитку західної частини північно-західного шельфу Чорного моря. Геологічний. журнал*, (2), 27-39.
12. Плотнікова, Л. Ф., Іванік, М. М., Шумник, А. В. (2003). *Стратиграфічне розчленування і історія розвитку морського басейну західної частини північно-західного шельфу Чорного моря в ранньокрейдовий час. Теоретичні та прикладні аспекти сучасної біостратиграфії фанерозою України*. Київ : ІГН НАН України, 165-167.
13. Ищенко, И. И., Якушин, Л. М., Плотнікова, Л. Ф. (2007). *Встановлення переривів в осадконакопиченні у крейдових розрізах свердловин північно-західного шельфу Чорного моря. Тектоніка і стратиграфія*, (35), 113-124.
14. Гожик, П. Ф., Маслун, Н. В., Плотнікова, Л. Ф., Іванік, М. М., Якушин Л. М., Ищенко, И. И. (2006). *Стратиграфія мезокайнозойських відкладів північно-західного шельфу Чорного моря*. Київ: Логос.

15. 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. *Геофизический журнал*, 29 (5), 28-49.
16. Gozhik, P. F., Maslun, N. V., Ivanik, M. M., Plotnikova, L. F., Yakushyn, L. M. (2008). Stratigraphic model of the mesozoic and cenozoic of the western Black Sea basin. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*, (2), 55-69.
17. Хрящевская, О. И., Стовба, С. Н., Попадюк, И. В. (2009). Стратиграфическая основа геолого-геофизических исследований Одесского шельфа (северо-западной части Чёрного моря): состояние, проблемы и пути их решения. *Геофизический журнал*, 31(3), 17-31.
18. Khriachtchevskaia Oxana, Stovba Sergiy, Popadyuk Igor. (2009). Hydrocarbon prospects in the Western Black Sea of Ukraine. *The Leading Edge*, 28 (9), 993-1160. <https://doi.org/10.1190/1.3236371>
19. Шевчук, О., Пустовойтова, Д. (2021). Стратифікація крейдових відкладів розрізу свердловини № 29 – Західно-Октябрської (Каркінітсько-Північнокримський прогин) за палеонотичними даними. *Вісн. Київ. нац. ун-ту ім. Т. Шевченка. Геологія*, 3 (94), 27-36. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.94.03>
20. 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. *Геофизический журнал*, 42 (5), 53-106. <https://doi.org/10.10.24028/gzh.0203-3100.v42i5.2020.215072>
21. Karpenko Ivan, Ischenko Ihor, Nikolenko Olha, Rodrigues Felipe, Levonyuk Serhii, Glon Vitalii, Wygrala Bjorn, Privalov Vitalii. (2021). Basins Analysis and Petroleum Systems Modeling of Western Black Sea, Ukrainian Sector. *The SPE Eastern Europe Subsurface Conference*. Kyiv. Paper Number: SPE-208527-MS <https://doi.org/10.2118/208527-MS>.
22. Стовба, С., Стифенсон, Р., Тищенко, А., Фенота, П., Венгровиц, Д., Мазур, С. (2023). Історія геологічного розвитку українського сектора Чорного моря із середини ранньої крейди до початку пізнього міоцену. *Геофизический журнал*, 45 (3), 3-49. <https://doi.org/10.24028/gj.v45i3.282411>
23. Шевчук, О. А., Якушин, Л. М., Доротяк, Ю. Б., Пустовойтова, Д. О. (2022). До питання про виділення готерів-баремських відкладів Каркінітсько-Північнокримського прогину (Західно-Октябрська площа) за мікрофосіліями. *Мінеральні ресурси України*. (2), 33-41. <https://doi.org/10.31996/mru.2022.2.33-41>
24. Якушин, Л. М., Супрун, І. С., Клименко, Ю. В., Веклич, О. Д., Доротяк, Ю. Б. (2024). Подійно-геологічна модель крейдово-палеоценових відкладів північно-західного шельфу Чорного моря: матеріали Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми гірничої геології та геоелекології» (с. 176-179). 27 листопада, 2024, Київ, Україна: ДУ НЦ ГТГРІ НАН України. <https://doi.org/10.59911/conf.mpmgg.2024.38>
25. Іщенко, І. І. (2013). Стратиграфія крейдових відкладів Північного Причорномор'я. *Стаття 1. Нижня крейда. Палеонотичний збірник*, (45), 83-98.

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 1. Lower Cretaceous

Ihor Ishchenko¹

DSc (Geology), Chief Specialist of the Regional Geological Research Department

¹ Kyiv Branch of UkrNDIGas, Kyiv, Ukraine;

Leonid Yakushyn²

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

ABSTRACT

Introduction. One of the tasks of the modern stratigraphy of the closed basins of Ukraine is to clarify and detail the existing stratigraphic schemes of Cretaceous sediments of the north-western shelf of the Black Sea, which are oil and gas bearing. *The aim of the study.* To revise the local stratigraphic units of the Cretaceous sediments of the Ukrainian sector of the northwestern Black Sea shelf proposed by the team of authors in 2013, as well as to revise our own proposals for the stratigraphy of this region, which were not included in the stratigraphic schemes of 2013, using a set of geological methods. *Object of study.* Cretaceous sediments of the Ukrainian sector of the north-western shelf of the Black Sea. *Subject of the study.* The stratigraphy of these deposits.

Materials and methods. The article analyses the drilling materials of 10 deep wells that uncovered Lower Cretaceous sediments of the northwestern shelf of the Black Sea and 10 wells of the adjacent land, the latest seismic data and results of previous geological and geophysical studies in the region, own developments and generalisations, as well as

information on the geological structure of the study area obtained from reports on the implementation of research works on geological study of the subsoil.

Results. A revision of local stratigraphic subdivisions of the Lower Cretaceous sediments of the Ukrainian sector of the northwestern Black Sea shelf was carried out using a set of geophysically based methods (logging), taking into account the results of regional seismic studies, paleontological determinations of the relative geological age of rocks, literary and stock materials. According to the results of the research, the Albian sediments are distinguished as part of the Tendrivska (for the first time) and Yevpatoriyska Formation. The Tendrivska Formation is named after the Tendrivska Spit on the north-western shelf of the Black Sea. It is identified for the first time. The stratotype is a section of the Tendrivska-19 well in the depth interval 2626-2500 m. It is distributed within the South Ukrainian monocline. It is represented by light grey limestones with yellowish tinge, organogenic detrital, coarse-grained, strong, dense. It occurs with a stratigraphic break in the Lower Aptian formations and overlies erosion contact or transgressively Cenomanian deposits. Deposits are up to 230 m thick. The Yevpatoriyska Formation is named after a structure on the Kalamitsky Rise on the north-western shelf of the Black Sea. Formerly known as the Kalamitska Formation. The name was changed due to pre-occupation. The stratotype is a section of the Yevpatoriyska-2 well in the depth interval 560-1060 m. It is distributed in the waters of the north-western Black Sea shelf within the Scythian plate. It is composed mainly of silicate rocks. It is divided into three sub-sections. Sediments are 500 m thick.

Conclusions. Based on the results of the research, it is proposed to distinguish the Albian sediments as part of the Tendrivska Formation (for the first time) and the Yevpatoriyska Formation. The sections of the formations offered for consideration are accompanied by geological and geophysical plates.

Keywords: *stratigraphy, Lower Cretaceous sediments, northwestern shelf of the Black Sea.*

References

1. Gozhyk, P. F. (Ed.). (2012). *Stratigraphic Code of Ukraine*. [2-nd edition]. Kyiv [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. Maslun, N. V., Zhabina, N. M., Ivanik, M. M., Vaga, D. D., Suprun, I. S. (2020). *Stratigraphic criteria for predicting hydrocarbon deposits in the Meso-Cenozoic formations of Ukraine. Modern problems of mining geology and geology: collection of materials of the international scientific conference*. Kyiv: DU NTs HHHRI NAN Ukrainy, 66-70 [in Ukrainian]
4. Yakushyn, L. M., Ishchenko, I. I. (2013). *Stratigraphy of the Mesozoic deposits of the Odesa shelf of the Black Sea. Proceedings of the IV International Scientific and Technical Conference «Geology and hydrocarbon potential of the Balkan-Black Sea region»*. Varna, Bulgaria, 57-63.
5. Ishchenko, I. I., Yakushyn, 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 [in Ukrainian]
6. Menkes, M. A., Voloshyna, G. M. (1975). *Micropaleontological characterization of Eocene, Paleocene and Upper Cretaceous sediments of the offshore Golitsynska well. Reports of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR*, B (10), 888-891 [in Ukrainian]
7. Plotnikova, L. F., Lyulieva, S. A. (1977). *New materials for stratigraphic partitioning of Upper Cretaceous sediments of the northwestern shelf of the Black Sea. Reports of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR*, B (1), 21-24 [in Ukrainian]
8. Teslenko, Yu. V. (Ed.). (1984). *Geology of the shelf of the Ukrainian SSR. Stratigraphy (shelf and coast of the Black Sea)*. Kyiv: Naukova Dumka.
9. Plotnikova, L. F. (2000). *To the stratigraphy of Cretaceous sediments of the northwestern shelf of the Black Sea. Biostratigraphic and paleoecological aspects of event Stratigraphy*. Kyiv : IGS NAS of Ukraine, 32-33.
10. Shumnyk, A. V. (2001). *Biostratigraphy of the Upper Cretaceous sediments of the northwestern shelf of the Black Sea and the Crimean continental slope by nanofossils. Geological Journal*, 3, 96-105 [in Ukrainian]
11. Plotnikova, L. F., Maslun, N. V., Ivanik, M. M., Tsikhotska N. N., Shumnyk, A. V. (2003). *Stratigraphy of Cretaceous-Paleocene sediments and features of geological development of the western part of the northwestern shelf of the Black Sea. Geological Journal*, 2, 27-39 [in Ukrainian]
12. Plotnikova, L. F., Ivanik, M. M., Shumnyk, A. V. (2003). *Stratigraphic dissection and history of the development of the marine basin of the western part of the northwestern shelf of the Black Sea in the Early Cretaceous. Theoretical and applied aspects of modern biostratigraphy of the Phanerozoic of Ukraine*. Kyiv: IGS NAS of Ukraine, 165-167 [in Ukrainian]
13. Ishchenko, I. I., Yakushin, L. M., Plotnikova, L. F. (2007). *Establishment of discontinuities in sedimentation in Cretaceous sections of wells of the northwestern shelf of the Black Sea. Tectonics and Stratigraphy*, 35, 113-124 [in Ukrainian]
14. 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]
15. Khryashevskaya, 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.
16. Gozhik, P. F., Maslun, N. V., Ivanik, M. M., Plotnikova, L. F., Yakushyn L. M. (2008). *Stratigraphic model of the mesozoic and cenozoic of the western Black Sea basin. Geology and Mineral Resources of the World Ocean*, 2, 55-69.

17. Khryashevskaya, O. I., Stovba, S. M., Popadyuk, I. V. (2009). Stratigraphic basis of geological and geophysical studies of the Odessa shelf (north-western part of the Black Sea): state, problems and ways of their solution. *Geophysical Journal*, 31 (3), 17-31.
18. Khriachtchevskaia Oxana, Stovba Sergiy, Popadyuk Igor. (2009). Hydrocarbon prospects in the Western Black Sea of Ukraine. *The Leading Edge*, 28 (9), 993-1160. <https://doi.org/10.1190/1.3236371>
19. Shevchuk, O., Pustovoitova, D. (2021). Stratification of Cretaceous sediments in the section of well No. 29 - Zakhidno-Oktyabrsk (Karkinitzko-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]
20. 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.0203-3100.v42i5.2020.215072>
21. Karpenko Ivan, Ischenko Ihor, Nikolenko Olha, Rodrigues Felipe, Levonyuk Serhii, Glon Vitalii, Wygrala Bjorn, Privalov Vitalii. (2021). Basins Analysis and Petroleum Systems Modeling of Western Black Sea, Ukrainian Sector. The SPE Eastern Europe Subsurface Conference. Kyiv. Paper Number: SPE-208527-MS <https://doi.org/10.2118/208527-MS>
22. 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]
23. Shevchuk, O. A., Yakushyn L. M., Dorotyak, Yu. B., Pustovoitova, D. O. (2022). To the question of the allocation of the Gotterivian-Bareman sediments of the Karkinitzko-North Crimean trough (West-October area) by microfossils. *Mineral resources of Ukraine*, 2, 33-41. <https://doi.org/10.31996/mru.2022.2.33-41> [in Ukrainian]
24. Yakushyn L. M., Suprun, I. S., Klymenko, Yu. V., Veklych, O. D., Dorotyak, Yu. B. (2024). Event-geological model of Cretaceous-Paleocene sediments of the northwestern shelf of the Black Sea. *Materials of the International Scientific Conference «Modern Problems of Mining Geology and Geoecology»*. Kyiv: DU NTs HHHRI NAS Ukraine, 176-179. <https://doi.org/10.59911/conf.mpmgg.2024.38> [in Ukrainian]
25. Ishchenko, I. I. (2013). Stratigraphy of the Cretaceous sediments of the Northern Black Sea region. Article 1: Lower Cretaceous. *Paleontological collection*, 45, 83-98 [in Ukrainian]

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 16 April 2025

Accepted 20 May 2025

Пегматити Мокромосковського гранітного масиву

Юлія Литвиненко

аспірантка,

Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України, Київ, Україна,

e-mail: ulitvi@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0002-7937-0164>

Мокромосковський масив складений світло-сірими гранітами та темно-сірими гранодіоритами. Світло-сірі граніти складені олігоклазом (35-40%), мікрокліном (20-25%), кварцом (30-35%) та біотитом (2-5%). Темно-сірі гранодіорити містять олігоклаз (40-55%), мікроклін (18-20%), кварц (25%) та біотит (5-7%). Світло-сірі граніти на окремих ділянках мікроклінізовані та набули рожевого кольору в результаті дії постмагматичних метасоматичних процесів. В приконтаткових зонах Мокромосковського масиву зустрінуті мусковітові граніти, в яких міститься мусковіт в кількості від 1 до 15%. Ці породи мають такий мінеральний склад: олігоклаз (35-40%), мікроклін (20-25%), кварцом (30-35%), мусковіт (1-15%) та біотитом (0-4%). На підставі геологічних маршрутів та опису шліфів, в межах Мокромосковського гранітного масиву, виділені два типу пегматитових жил – біотитові та мусковітові. Мусковітові пегматити зустрічаються в південному, південно-східному та південно-західному ендоконтактах Мокромосковського масиву. Біотитові пегматити зустрінуті в центральній частині масиву. В південному та південно-західному екзоконтактах пегматитові жили зустрінуті у вмісних породах та утворюють Мокромосковське пегматитове поле. Біотитові пегматити складаються з біотиту, мікрокліну, кварцу та олігоклазу. Мусковітові містять мусковіт, мікроклін, кварц, олігоклаз, альбіт. Виявлені зональні та азональні пегматитові жили, азональні січуть зональні жили. Біотитові пегматити мають таку зональність: зовнішня зона крупнозерниста біотит-мікроклін-кварц-олігоклазова, проміжна зона – письмова кварц-мікроклін-олігоклазова, внутрішня зона – кварцова. Зовнішня зона іноді збагачена біотитом, проміжна зона не завжди має письмову структуру. Внутрішня кварцова зона в деяких зональних жилах відсутня. Мусковітові зональні пегматити складаються з зовнішньої мусковіт-кварц-мікроклінової крупнозернистої зони, проміжної кварц-мікроклінової письмової зони та центральної мікроклін-кварцової або кварцової зони. Іноді мусковітові пегматити містять альбіт та до 30% мусковіту. В мусковітових пегматитових жилах Мокромосковського пегматитового поля виявлені підвищені вмісти танталу, ніобію, літію, берилію, рубідію, цезію, іноді – рідкісноземельних металів.

Ключові слова: Запорізька область, Мокромосковський гранітний масив, пегматит, пегматитова жила, граніт.

Як цитувати: Литвиненко Юлія (2025). Пегматити Мокромосковського гранітного масиву. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (62), 59-71. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-04>

In cites: Lytvynenko Yuliia (2025). Pegmatites of the Mokromoskovsk granite pluton. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (62), 59-71. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-04> [in Ukrainian]

Вступ. Мокромосковський масив – це великий масив, площею більше 1000 км², західний контакт якого розташований на східній околиці м. Запоріжжя. Масив витягнутий з півночі на південь і має форму наближену до трикутника, широка сторона трикутника розташована з півночі, вузька – з півдня. Мокромосковський масив знаходиться в межах Середньопридніпровського мегаблоку Українського щита. Мокромосковський масив містить численні пегматитові жили, також пегматитові жили спостерігаються у вмісних породах. Зустрінуті два типи пегматитів: біотитові та мусковітові пегматитові жили.

Мокромосковський масив віднесений до окремого Мокромосковського комплексу в 1973 р. Орсою В.І. [1], до цього масив належав до житомирського комплексу. Масив має всі ознаки магматичного походження: активні контакти, витриманість мінералогічного та хімічного складу на великій площі [2]. В радянські часи з різним ступенем детальності мокромосковські граніти вивчали Н.П. Семененко [3], О.О. Ткачов [4], І.С. Усенко [5], В.І. Орса [2, 6], Б.З. Берзенин та В. М. Кичурчак [7]. В цих роботах охарактеризовані мінеральний склад, петрологія та геохімія гранітів

Мокромосковського масиву, пегматити не розглянуті.

В 1981 р. вийшла стаття Берзенина Б. З., Боброва А. Б. та Кичурчака В. М., в якій вони визначали температури утворення рідкометальних пегматитів Середнього Придніпров'я за гомогенізацією розплавних включень. Температури кристалізації пегматитів, отримані авторами, складають 540-620°C. Автори в статті доходять висновку, що пегматити мають первинно-магматогенне походження [9]. За сучасними уявленнями [10] мусковітові пегматити мають температури кристалізації 675 ± 50 °C, мусковіт-рідкіснометалеві 535 ± 25 °C, рідкісноземельні елемент: $\sim 525 \pm 20$ °C.

В 2004 р. закінчено геологічне довивчення площі листа аркуша L-36-VI(Запоріжжя), L-37-I (Пологи), відповідальний виконавець А.А. Петренко. В пояснювальній записці описані пегматитові жили. Мінеральний склад та зональність пегматитових жил не розглянуті [11].

В 2007 видана Державна геологічна карта України масштабу 1:200 000. аркушів М-36-XXXVI (Дніпропетровськ) [12].

В 2006-2008 р.р. вийшла низка статей за авторством Ісакова, Сукача, Боброва, в яких деталь-

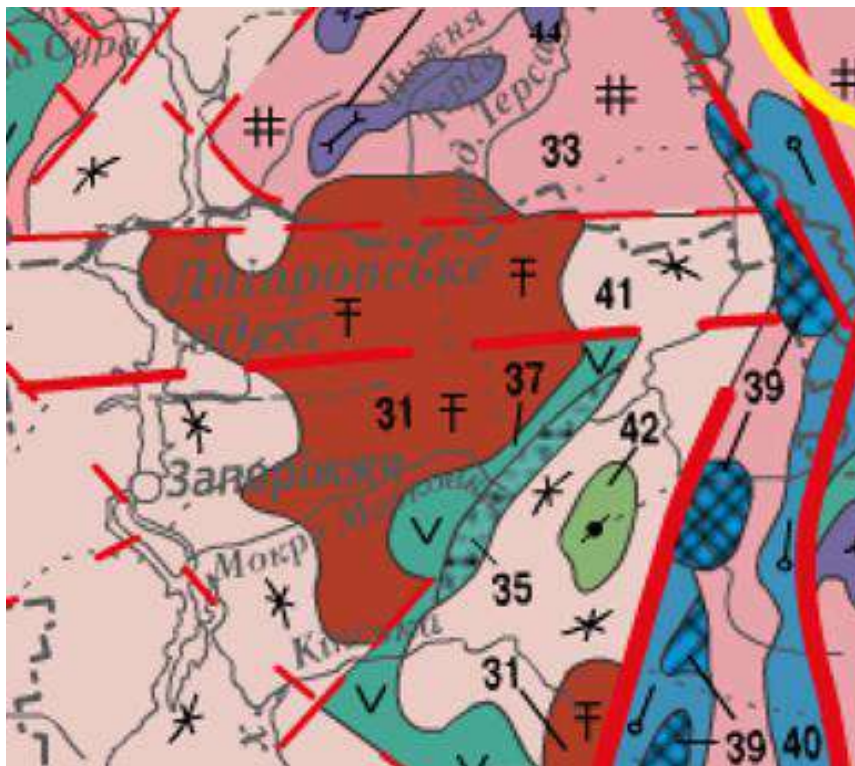


Рис. 1. Геологічна карта Мокромосковського масиву та його оточення [8]:

31 – двопольовошпатові граніти мокромосковського комплексу; 33 – граніти й мігматити, плагіограніти, ендербіт-чарнокітоїди токмацького й шевченківського комплексу; 35 – Метасісковики, метаалевроліти, метаконгломерати, залізисті кварцити (білозірська серія); 37 – Коматііти, меттолеїти, метаріоліти, сланці (кінська серія, осипенківська серія, косівцівська товща), гарцбургіти, дуніти, піроксеніти (варварівський, верхівцевський комплекси); 39 – Мармури, кальфіфіри, скарноїди, гнейси, залізисті кварцити (хашувато-завалівська та дем'янівська світи, бузька й центральноприазовська серії); 40 – Високоглиноземисті й графітові гнейси та сланці (олександрівська і темрюцька світи); 42 – Амфіболові гнейси, амфіболіти, залізисті кварцити (аульська серія); 44 – Гнейси гранат-біотитові, графіт-біотитові, гнейси й кристалосланці гіперстеніві й піроксен-амфіболові (дністровсько-бузька, західноприазовська серії, славгородська товща) /

Fig. 1. Geological map of the Mokromoskovsk pluton and its surroundings [8]:

31 – difeldspar granites of the Mokromoskovsk complex; 33 – granites and migmatites, plagiogranites, enderbite-charnochitoids; 35 – Metasandstones, metasiltstones, metaconglomerates, ferruginous quartzites; 37 – Komatiites, mettleites, metaryolites, shales, harzburgites, dunites, pyroxenites; 39 – Marbles, calphyphyres, skarnoids, gneisses, ferruginous quartzites; 40 – High-alumina and graphite gneisses and schists; 42 – Amphibole gneisses, amphibolites, ferruginous quartzites; 44 – Garnet-biotite, graphite-biotite gneisses, hypersthene and pyroxene-amphibole gneisses and crystal schists

но розглянуті мусковітові пегматити південно-східного ендоконтакту та екзоконтакту. В цих статтях детально розглянута мінералогія мусковітових пегматитів, зональність та рудоносність [13, 14, 15].

Для цирконів типового сірого граніту Мокромосковського масиву визначено вік 2827 ± 7 млн років [16], в інших джерелах 2835 млн. років [17, 18] Вік мокромосковського граніту за монацитом становить 2700 ± 8 млн років [19].

Біотитові пегматити центральної частини Мокромосковського масиву поверхнево охарактеризовані в пояснювальних записках до геологічних карт масштабу 1:200 000 [11, 12]. В цих роботах наведений мінеральний склад та геохімічна спеціалізація біотитових пегматитів, зональність

та розповсюдженість пегматитових жил не описана. Статті з детальним описом обох типів пегматитових жил, з порівнянням біотитових та мусковітових пегматитів відсутні.

В статті Берзеніна та Кичурчака [7] стверджується, що кількість пегматитових жил більша в центральній частині Мокромосковського масиву. В інших опублікованих джерелах [13, 14, 15] автори стверджують, що більшість пегматитових жил розташовані в приконтактних частинах масиву. Наявність та відсутність зональності в пегматитах, характер зональності, співвідношенні зональних та азоняльних жил слабо висвітлене в опублікованій літературі. Повна характеристика пегматитів, що пов'язані з Мокромосковським масивом, наводиться вперше.

В 2005 р. Петр Черні та Т. Скотт Ерсіт [20] опублікували нову класифікацію пегматитів, в якій запропоновано поділяти пегматити на абісальні, мусковітові, мусковіт-рідкіснометальні, рідкісноземельні та міаролові. Абісальні пегматити за цією класифікацією не мають зв'язку з інтрузіями.

В 2020 р. з'явилась стаття [21], в якій розглянуті швидкості росту кристалів в пегматиті на прикладі пегматиту Стюарта в південній Каліфорнії, США. Концентрації мікроелементів в кварці пегматитів значно відхиляються від рівноважних. Це найкраще пояснюється кінетичними ефектами, пов'язаними зі швидким ростом кристалів. За результатами дослідження кристали метрового розміру в пегматитах могли утворитися протягом кількох днів.

В 2023 р. опублікована стаття [22], в якій досліджений Шанкеланський граніт-пегматитовий масив, відомий своєю внутрішньою зональністю та вольфрамовою мінералізацією, в Китайському Алтаї. Авторами встановлено, що в пегматитах є вторинний мусковіт, що з'явився в результаті грейзенізації та має високий вміст фтору та вольфраму.

В статі про пегматитові жили у батоліті Муфушань у Південному Китаї [23] також досліджений мусковіт з пегматиту. Автори доходять висновку, що просуваючись від пристінної зони до центральної зони в пегматитових жилах, мусковіт демонструє зростаюче збагачення несумісними елементами (літій, рубідій, цезій, тантал, манган та фтор), але збіднення титаном, цирконем, свинцем, що свідчить про тенденцію до диференціації.

В 2024 в статті китайських дослідників [24] вивчався генетичний зв'язок між материнським гранітом та зональним рідкіснометалевим пегматитом у граніт-пегматитовій системі Ренлі-Чуаньцзиуань у Південному Китаї. Автори доходять висновку, що мусковітовий монцограніт демонструє чітко визначені просторові та часові зв'язки з пегматитами рідкісних металів.

Методи. При написанні статті використані результати опису стінок 10 діючих та вироблених кар'єрів, розташованих в межах Мокромосковського масиву по р. Мокра Московка та Вільнянка, проведені автором. Спостереження проводились також в 6 геологічних маршрутах за межами кар'єрів. Також для статті були описані петрографічні шліфи (54 шт.), відібрані з гранітів та пегматитів Мокромосковського масиву. Для побудови карти фактичного матеріалу, схеми розташування різних типів пегматитів використаний програмний комплекс QGIS. Для отримання діаграм використана програма MS Excel. Хімічні аналізи гранітів (15 проб) та пегматитів (6 проб) виконані в науково-дослідному інституті хімії Харківсько-

го університету імені В.Н. Каразіна.

Результати. Мокромосковський масив здебільшого складений середньозернистими світло-сірими гранітами, серед яких зустрінуті дайки темно-сірого гранодіориту. Світло-сірі граніти на окремих ділянках мікроклінізовані та набули рожевого кольору в результаті дії постмагматичних метасоматичних процесів.

За описом шліфів встановлено, що світло-сірі граніти складені олігоклазом (35-40%), мікрокліном (20-25%), кварцом (30-35%) та біотитом (2-5%). Структура породи гіпідіоморнозерниста.

Темно-сірі гранодіорити містять: олігоклаз (40-55%), мікроклін (18-20%), кварц (25%) та біотит (5-7%). Структура – гіпідіоморнозерниста.

В рожевих гранітах збільшена кількість мікрокліну до 35% за рахунок олігоклазу, кількість якого зменшується до 25%, біотит заміщений хлоритом та зустрічаються зелені епідот-альбіт-цойтові жили.

Згідно TAS-діаграми світло-сірі породи Мокромосковського масиву відносяться до гранітів, один зразок з темно-сірих порід – до гранодіоритів.

За QAPF-діаграмою більшість порід Мокромосковського масиву попадають в поле гранітів, лише два зразка з темно-сірих гранітів потрапили в поле гранодіориту.

В приконтаткових зонах Мокромосковського масиву зустрінуті мусковітові граніти, в яких міститься мусковіт в кількості від 1 до 15%. Ці породи мають такий мінеральний склад: олігоклаз (35-40%), мікроклін (20-25%), кварц (30-35%), мусковіт (1-15%) та біотитом (0-4%).

Пегматитові жили зустрічаються в світло-сірих та рожевих гранітах, темно-сірих гранітах та мусковітових гранітах приконтаткових зон, а також утворюють велике поле в східному екзоконтаті масиву у вмісних породах (Мокромосковське пегматитове поле). Пегматитові жили, що зустрінуті серед рожевих гранітів, також мають рожевий та зеленкуватий колір.

Орієнтовані пегматитові жили хаотично, виділити переважаючі напрямки не вдається. Пегматитові жили часто мають вигнуту форму та розгалуження.

Пегматитові жили виділяються в рельєфі при вивітрюванні.

Пегматитові жили в центральній частині масиву серед сірих та рожевих біотитових гранітів містять біотит. В приконтаткових зонах масиву серед мусковітових гранітів зустрінуті мусковітові пегматити.

Хімічний аналіз проведений за зразками, відібраними з азональних пегматитів. За хімічним складом біотитові пегматити близькі до світло-сірих гранітів основної фази, пегматити містять меншу кількість CaO та більшу K₂O, що пов'язано з

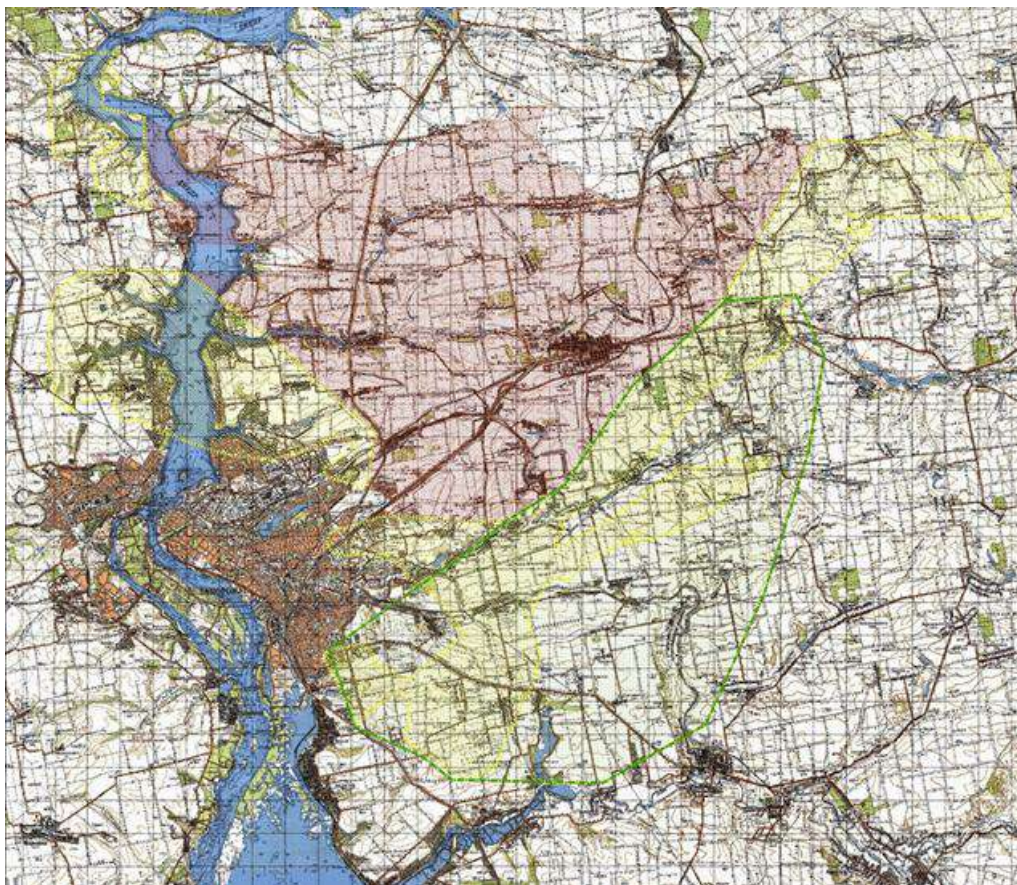


Рис. 2. Схема розташування різних типів пегматитів.

Червоним крапом показана зона розповсюдження біотитових пегматитів в межах масиву, жовтим крапом – мусковітових пегматитів в межах масиву, зеленим контуром – Мокромосковське пегматитове поле мусковітових пегматитів в ендо- та екзоконтакті масиву /

Fig. 2. Plan of the different pegmatites types location.

The red dot shows the distribution zone of biotite pegmatites within the massif, the yellow dot shows muscovite pegmatites within the massif, the green contour shows the Mokromoskovsk pegmatite field of muscovite pegmatites in the endo- and exocontact of the massif

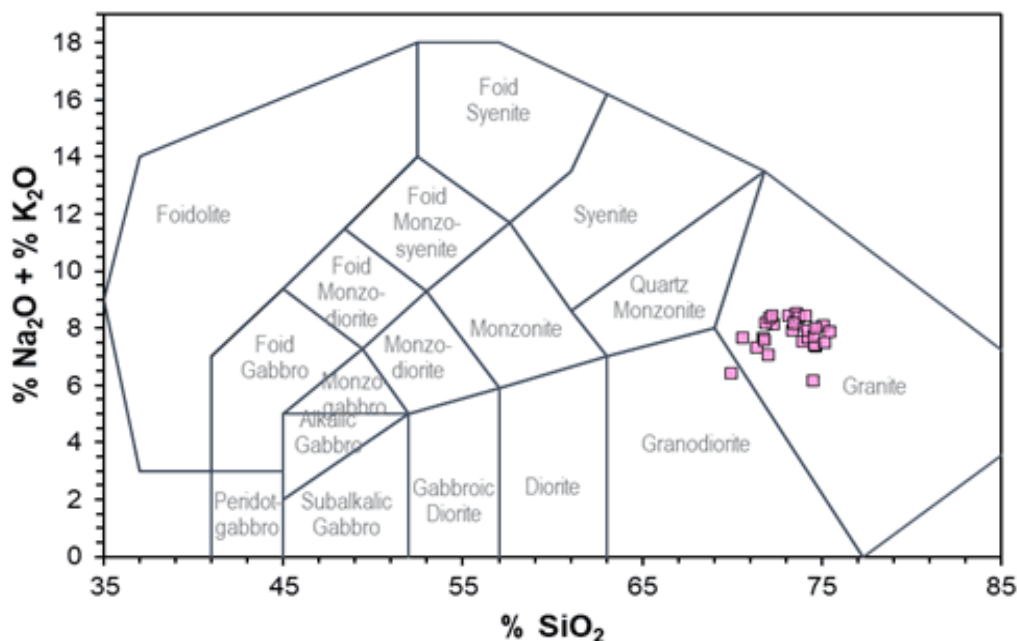


Рис. 3. TAS-діаграма [19] з результатами хімічного аналізу гранітів Мокромосковського масиву /

Fig. 3. TAS diagram [19] with the results of chemical analysis of Mokromoskovsk pluton granites



Рис. 4. QAPF-діаграма [27] з результатами петрографічного аналізу порід Мокромосковського масиву /
Fig. 4. QAPF diagram [19] with the results of petrographic analysis of Mokromoskovsk pluton rocks



Рис. 5. Пегматитова жила, проявлена в рельєфі в результаті вивітрювання у с. Георгієвське /
Fig. 5. Pegmatite vein, manifested in the relief as a result of weathering in the Georgiyevske village

Таблиця 1 / Table 1

Вмісту основних оксидів в породах Мокромосковського масиву /
The content of basic oxides in the rocks of the Mokromoskovsk pluton

Порода/Оксид	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
Граніт біотитовий світло-сірий	68,28	15,94	0,18	1,60	0,65	0,77	4,65	3,42	4,38
Граніт біотитовий темно-сірий	64,10	18,28	0,25	2,78	1,23	0,69	4,49	3,55	4,55
Граніт мусковітовий	67,24	15,04	0,25	1,06	1,88	0,59	3,68	4,45	5,53
Пегматит біотитовий	66,76	16,12	0,38	1,47	1,74	0,58	3,50	3,84	5,35
Пегматит мусковітовий	65,74	15,20	0,53	0,98	1,88	0,44	2,77	4,47	6,75

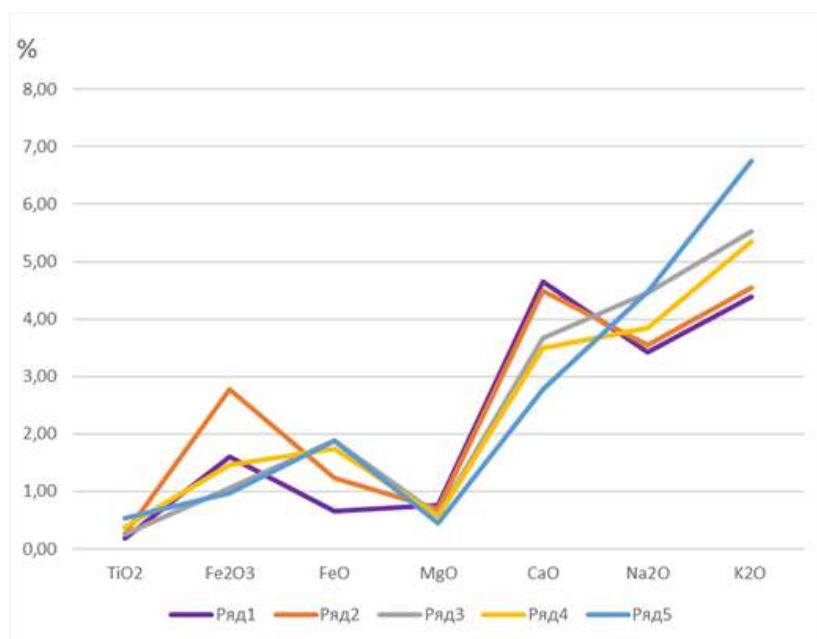


Рис. 6. Діаграма вмісту основних оксидів (окрім кремнезему та глинозему) в породах Мокромосковського масиву: ряд 1 – граніти біотитові світло-сірі, ряд 2 – гранодіорити біотитові темно-сірі, ряд 3 – граніти мусковитові, ряд 4 – пегматити біотитові, ряд 5 – пегматити мусковитові /

Fig. 6. Diagram of the content of major oxides (except silica and alumina) in rocks of the Mokromoskovsk pluton: row 1 – light gray biotite granites, row 2 – dark gray biotite granodiorites, row 3 – muscovite granites, row 4 – biotite pegmatites, row 5 – muscovite pegmatites

меншим вмістом в пегматитах олігоклазу та більшим мікрокліну в порівнянні з гранітами. В мусковитових пегматитах спостерігається менша кількість CaO, але кількість Na₂O більша, що пов'язано з наявністю альбіту в пегматиті. В мусковитовому пегматиті значно більша кількість K₂O в порівнянні зі світло-сірим гранітом, що пов'язано з появою мусковіту і більшою кількістю мікрокліну.

Мусковитові пегматити зустрічаються в південному, південно-східному та південно-західному ендоконтактах Мокромосковського масиву. В південному та південно-західному екзоконтактах пегматитові жили зустрінуті у вмісних породах та утворюють Мокромосковське пегматитове поле.

Біотитові пегматити. В центральній та північній частині Мокромосковського масиву виявлені біотитові пегматити. Біотит-кварц-мікроклін-олігоклазові пегматити представлені дрібними зональними та азональними жильними тілами потужністю до 10 м. Поширені біотитові пегматити в середині масиву на ділянках, складених біотитовими відмінами гранітів Мокромосковського масиву. В районі р. Вільнянка виявлений Вільнянський пегматитовий вузол.

В кар'єрі Новому Янцівському родовища зустрінуті зональні пегматитові жили. Зовнішня зона дрібнокристалічна складена біотитом (30%), кварцом (30%), мікрокліном (15%), олігоклазом (25%). Наступна зона – крупнозерниста, складена

мікрокліном (15%), олігоклазом (15%), кварцом (55%) та біотитом (5%). Внутрішня зона складається з кварцу і наявна не в кожній зональній жилі.

На рис. 8 спостерігається зовнішня дрібнозерниста багата біотитом зона та біотит-мікроклін-кварц-олігоклазова центральна зона.

У відслоненні біля с. Георгіївське зустрінута зональна пегматитова жила потужністю 5,2 м. Виділяються такі зони: зовнішня – крупнозерниста біотит-мікроклін-кварц-олігоклазова, наступна зона – письмова кварц-мікроклін-олігоклазова, внутрішня зона – кварцова.

Зустрічаються також азональні жили, що складаються з кварцу, польових шпатів та біотиту. Іноді біотит відсутній. Частіше крупні жили зональні, а дрібні – азональні. Але зустрічаються і невеликі зональні жили.

Азональні жили пересікають зональні, тобто азональні пегматити є більш молодими утвореннями.

У біотитових гранітах внутрішньої частини Мокромосковського масиву виявлено сильну позитивну геохімічну спеціалізацію на молибден, літій, хром; позитивну на вісмут, свинець, нікель, мідь, барій; негативну – на срібло, фосфор, марганець [16].

Мусковитові пегматити. Мусковитові та мусковит-біотитові пегматитові жили виявлені в ендоконтактах в західній і південній частині масиву, але найбільша кількість зустрінута в південно-



Рис. 7. Стінка кар'єра Кам'яний Янцівського родовища з вигнутими та розгалуженими пегматитовими жилами / Fig. 7. Kamyany quarry of the Yantsiv deposit with curved and branched pegmatite veins



Рис. 8. Зональна біотитовмісна пегматитова жила в стінці кар'єру Новий Янцівського родовища / Fig. 8. Zonal biotite-bearing pegmatite vein in the pit wall of the Novyi Yantsivskoye deposit

східному контакті, де виділене Мокромосковське пегматитове поле. Мокромосковське поле простягається з півночі на південь, в приконтактовій зоні Мокромосковського масиву та вмінних породах аульської, білозерської та конської серій, дніпропетровського комплексу (див. рис. 1) [28]. Пегматити в межах поля поширені досить нерівномірно, утворюють окремі скупчення – вузли. Виявлені чотири вузли пегматитів, пов'язані з Мокромосковським масивом: мусковіт-польовошпатовий - Веселий; інші три вузли умовно рідкіснометалевих та рідкіснометалевих мусковіт-польово-

шпатових пегматитів: Новостепнянський, Благо-віщенський та Приморський [15].

Мусковіт-кварц-мікроклінові, мусковіт-кварц-олігоклаз-мікроклінові та мусковіт-кварц-альбіт-мікроклінові пегматитові жили, які є головними складовими пегматитового поля, поширені в екзо- та ендоконтактових зонах масивів мусковітових та мусковіт-біотитових гранітів Мокромосковського масиву. Ці пегматити виявлено у великій кількості відслонень по р. Мокра Московка, їх розкрито низкою свердловин під час геолого-зйомочних робіт [15].



Рис. 9. Кварцова центральна зона зонального пегматиту у вивітрілій пегматитовій жилі у с. Георгієвське / Fig. 9. Quartz central zone of zonal pegmatite in a weathered pegmatite vein in Georgiyevske village



Рис. 10. Азональна біотитвмісна пегматитова жила в Основному кар'єрі Янцівського родовища в с. Кам'яне / Fig. 10. Azonal biotite-bearing pegmatite vein in the Main quarry of the Yantsiv deposit in Kam'yane village

У скельному відслоненні по р. Мокра Московка зустрінуті пегматитові жили потужністю до 2 м зональної будови. В цих жилах присутні три зони: зовнішня мусковіт-кварц-мікроклінова крупнозерниста зона, кварц-мікроклінова письмова зона та центральна мікроклін-кварцова блокова зона. Дрібні пегматитові жили в цьому ж відслоненні азональні [12].

Нижче за течією по р. Мокра Московка зустрінуті дрібні (20-30 см) зональні пегматитові жили. В них зовнішня зона мусковіт-кварц-олігоклаз-мікроклінова та внутрішня зона кварцова.

Зона блокового кварцу займає до 50% об'єму пегматитових жил. Вміст мусковіту в мусковіт-кварц-мікрокліновій зоні досягає 30%.

У районі с. Веселівське у відслоненні серед двослюдяних гранітів зустрінуті численні пегматитові жили та гнізда. Потужність жил досягає 2-3 м, протяжність – десятки метрів. Пегматитові жили азональні, складені крупними та гігантськими зернами кварцу, мусковіту та польових шпатів. Розмір лусок мусковіту - 5×5 см. Середній вміст мусковіту сягає 15-30% [14].

Пегматити з більшим різноманіттям мінера-



Рис. 11. Зональна мусковітвмісна пегматитова жила у відслоненні
по р. Мокра Московка у с. Наталіївка /

Fig. 11. Zonal muscovite-bearing pegmatite vein in the outcrop along the Mokra Moskovka River in Nataliivka village



Рис. 12. Азональна мусковітвмісна пегматитова жила у відслоненні біля с. Веселівське /
Fig. 12. Azonal muscovite-bearing pegmatite vein in an outcrop near Veselivske village

льного складу зустрінуті південніше в ендо- та екзоконтакті масиву. Пегматитові жили складаються з мусковіту, кварцу, олігоклазу, альбіту та мікрокліну. В цих пегматитах зафіксований підвищений вміст танталу, ніобію, літію, рубідію та цезію. Високий вміст танталу зустрінутий в дрібних пегматитових жилах південно-східного ендоконтакту Мокромосковського масиву – 0,005 %, в асоціації з ніобієм – 0,009 %, з літієм – 0,065 %, рубідієм – 0,050 %, цезієм – 0,005 %. Вміст танталу 0,001% виявлено в пегматитових жилах, розкритих свердловинами № 3266, 3267, 3268.

Пегматити, які умовно можна зачислити до рідкіснометалевих, виявлені у свердловинах № 6, 10, 11, 12 (свердловини, пробурені під час ГГК-50) [12]. Описані породи формують три вузли рідкіснометалевих та рідкіснометалевих мусковітпольовошпатових пегматитів – Новостепнянський, Благовіщенський та Приморський [15].

Новостепнянський вузол. У свердловині №6 в інтервалі 166,9-170,5 м знайдено пегматитову жилу азональну, складену альбітом (35%); кварцом (31%); олігоклазом (20%); мусковітом (11%), зустрінутий гранат (до 3%). Колір породи

рожевий та зеленкуватий. Вміст ніобію в пегматиті становить 0,01–0,02 %, танталу – 0,001 %. Також зустрінуті підвищені вмісти берилію, літію, рубідію, цезію [13]. У свердловинах №18–21 описані численні жили пегматитів мусковіт-мікроклін-плагіоклазового складу потужністю 0,7–3,5 м. Наприклад, у св.№ 20 в інтервалі 216,6–219,8 м описаний пегматит рожевий, мікрокліновий, крупнозернистий, з великими лусками світлої та бурої слюди. Зустрінуті кристали мікрокліну розміром до 3 см. За даними спектрального аналізу, у них підвищений вміст ніобію та берилію [12].

Приморський вузол. Ця ділянка розташована в екзоконтакті гранітоїдів Хортицької серії, але за думкою низки дослідників [13, 14, 15] не належить до хортицької асоціації, а пов'язані з похованим Мокромосковським масивом. Кількість пегматитів в породі сягає 30%. Пегматити за мінеральним складом і геохімічними особливостями подібні до пегматитів Новостепняського вузла. Пегматити вузла являють собою світло-сірі, іноді з зеленкуватим відтінком різнозернисті та гігантозернисті породи. Жили азональні або зональні з погано вираженою зональністю, що включають апліто-пегматоїдну зону, кварц-мікроклінову, кварц-альбіт-мікроклінову, мікроклін-кварц-альбітову (з графічною структурою) зони. Пегматити мають такий мінеральний склад з (%): кварцу – 30, олігоклазу – 15, альбіту – 40, мусковіту – 10, гранату – 3–5. Вміст ніобію в пегматитових жилах складає 0,013–0,017 %, танталу – 0,001–0,002 %, сума рідкісноземельних металів – до 0,14 %, літію – 0,005–0,007 % [14].

Достатньо велика пегматитова жила (видима потужність – 47,0 м) розкрита свердловиною №11 в інтервалі 102,6–149,6 м. Пегматит має мусковіт-кварц-альбіт-мікроклін-плагіоклазовий склад, рожевий колір, гігантокристалічну структуру. У пегматитовій жилі, за даними польового опису, умовно можна виділити такі зони: зовнішня - графічна; наступна - пегматоїдного граніту, внутрішня складена гігантськими кристалами альбіту, кварцу і мікрокліну [12].

За даними спектрального аналізу, у пегматитах міститься, %: ніобію – 0,007–0,030; літію – 0,002–0,011; олова – 0,001–0,005; ітрію – 0,001–0,007; рідкісноземельних металів – 0,03–0,11 [14].

Благовіщенський вузол. Пегматитові жили виявлені серед кварц-серицит-хлоритових, кварц-хлоритових, кварц-біотит-хлоритових, іноді гранатовмісних, кварц-серицитових сланців, а також метапсковиків. Рідше трапляються (гранат)-біотит-амфіболові сланці, частіше в асоціації з магнетитовими сланцями і кварцитосланцями. Пегматити зустрінуті низкою картувальних свердловин та представлені жилами потужністю перші метри, вони азональні, мусковіт-кварц-альбітові,

дрібно-середньозернисті, місцями письмової структури. Під мікроскопом визначено кварц-мікроклінову альбітовмісну породу гіпідіоморфнозернистої структури і масивної текстури; мінеральний склад: мікроклін – 75 %, кварц – 20 %, альбіт – 5 %, мусковіт – поодинокі зерна. За даними спектрального аналізу, в пегматитах зафіксовано високий вміст ніобію, берилію та олова, тому цей вузол умовно можна віднести до рідкіснометалевого [14].

Таким чином, в межах Мокромосковського пегматитового поля серед гранітів і вмісних порід аульської, білозерської та конської серій, дніпропетровського комплексу зустрінуті пегматитові жили мусковіт-кварц-олігоклазові, мусковіт-кварц-мікроклін-олігоклазові. Пегматити Мокромосковського поля білі, рожевувато- й жовтуватозеленкуваті-сірі. Пегматити складаються з: олігоклазу та альбіту – 30–55%; мікрокліну – 15–40%; кварцу – 25–60%; мусковіту – 5–30%; акцесорні мінерали представлені колумбітом, титанітом, цирконом, гранатом, апатитом магнетитом, рідше монацитом і турмаліном. Спостерігаються зональні та азональні пегматитові жили. Зональні жили включають три зони: зовнішня зона пегматоїдного граніту мусковіт-кварц-мікроклінового складу; наступна зона письмового граніту; внутрішня зона блокового пегматиту кварц-мікроклінового складу. Зустрічаються також дрібні жили з чіткою зональністю [15].

В приконтаткових зонах масиву кількість пегматитових жил значно збільшена в порівнянні з центральною частиною, що спостерігається в численних кар'єрах по р. Мокра Московка та Вільнянка, а також було зафіксовано при проведенні ГГК-200.

В мусковітових пегматитових жилах Мокромосковського пегматитового поля виявлені підвищені вмісти танталу та ніобію [4]. В пегматитових жилах південно-східного ендоконтакту Мокромосковського масиву зустрінутий найвищий вміст танталу – 0,005 %, ніобію – 0,009 %, з літію – 0,065 %, цезію – 0,005 %, рубідію – 0,050 % [14].

Висновки. Пегматитові жили зустрічаються повсюдно в межах Мокромосковського масиву, але в крайових частинах масиву зростає кількість пегматитових жил в порівнянні з центральною частиною. Пегматити, пов'язані з Мокромосковським масивом, також виявлені у вмісних породах аульської, білозерської та конської серій, дніпропетровського комплексу переважно в південно-східному екзоконтакті масиву. Зустрічаються біотитовмісні та мусковітовмісні пегматити. Тип жил залежить від складу гранітів, в яких вони зустрінуті: у біотитових гранітах зустрічаються біотитовмісні пегматити, в двослюдяних та мусковітових гранітах зустрічаються мусковітовмісні

пегматити. Біотитові пегматити зустрінуті майже виключно в середині масиву. Біотитвмісні пегматити складаються з біотиту, мікрокліну, кварцу та олігоклазу. Мусковітвмісні містять мусковіт, мікроклін, кварц, олігоклаз, альбіт.

В межах Мокромосковського масиву та в його екзоконтакті виявлені зональні та азональні пегматитові жили, азональні пересікають зональні жили. Мусковітові пегматити зустрінуті в приконтактних зонах масиву та у вмісних

породах, ці пегматити утворюють в східному ендоконтакті та екзоконтакті Мокромосковське пегматитове поле. Мокромосковське пегматитове поле об'єднує чотири вузли пегматитів: Веселий мусковіт-польовошпатових пегматитів, Благовіщенський, Новостепеннянський та Приморський рідкіснометалевих пегматитів. Для пегматитів Мокромосковського пегматитового поля характерні підвищені вмісти танталу, ніобію, літію, берилію, рубідію, цезію, іноді - рідкісноземельних металів.

Список використаних джерел

1. Орса, В. И. (1983). *Петрология гранито-гнейсового комплекса Среднего Приднепровья*. К., Наукова Думка.
2. Орса, В. И. (1988). *Гранитообразование в докембрии Среднеприднепровской гранит-зеленокаменной области*. К., Наукова Думка.
3. Семененко, Н. П. (1949). *Структура кристаллического массива Среднего Приднепровья*. АН УССР.
4. Ткачев, О.О. (1937). До петрології гранітів кристалічної смуги (профіль Мокромосковського батоліту). *Геологічний журнал*, 4 (1), 117-144.
5. Усенко, І.С., Орса, В.І., Хатунцева, А.Я., & Цуканов, В.О. (1973). Геосинклінальні гранітоїди Українського щита. *Геологічний журнал*, 33 (1), 3-13.
6. Щербаков, И. Б., Есипчук, К. Е., & Орса, В. И. (1984). *Гранитоидные формации Украинского щита*. К., Наукова думка.
7. Берзенин, Б.З., Кичурчак В.М. (1978). К петрологий Мокромосковского массива. *Геологический журнал*, 38 (5), 132-135.
8. Руденко, Л.Г. (Ред). (2007). *Національний атлас України. Картографія*.
9. Берзенин, Б. З., Бобров, А. Б., & Кичурчак, В. М. (1981). Физико-химические условия образования редкометалльных пегматитов Среднего Приднепровья. *Геохимия и рудообразование*, 9, 63-66.
10. McCaffrey, D.M., & Jowitt, S. M. (2023) The crystallization temperature of granitic pegmatites: The important relationship between undercooling and critical metal prospectivity. *Earth-Science Reviews*, 244, 11-32. doi: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104541>.
11. Петренко, А.А., Шпильчак, В.О., & Некряч, А.І. (2004). Державна геологічна карта України масштабу 1 : 200 000, аркуші L-36-VI (Запоріжжя), L-37-I (Пологи). УкрДГРІ.
12. Шпильчак, В.О., Манюк, В.В., Сукач В.В., & Некряч, А.І. (2007). Державна геологічна карта України масштаб 1:200 000, аркуші: М-36-XXXVI (Дніпропетровськ). УкрДГРІ.
13. Ісаков, Л. В. (2006). Геолого-структурні особливості Середньопридніпровського мегаблоку і його перспективи на рідкіснометалеві пегматити. *Геолого-мінералогічний вісник Криворізького національного університету*, 16 (2), 73-79.
14. Ісаков, Л. В., & Бобров, О. Б. (2007). Пегматитові поля Середньопридніпровського пегматитового району та основні геологічні чинники їх формування. *Збірник наукових праць УкрДГРІ*, (3), 35-45.
15. Ісаков, Л. В., Бестужев, О. М., Кузь, В. Д., & Шурко, М. М. (2008). Структурна позиція та внутрішня будова Мокромосковського пегматитового поля (Середньопридніпровський мегаблок). *Збірник наукових праць УкрДГРІ*, (1), 40-49.
16. Степанюк, Л.М., & Курило, С.І. (2019). *Геохімія двопольовошпатових гранітоїдів середнього Придніпров'я*. К., Наукова Думка.
17. Єсипчук, К. Ю., Бобров, О. Б., & Степанюк, Л. М. (2004). Кореляційна хроностратиграфічна схема раннього докембрію Українського щита (схема та пояснювальна записка). *УкрДГРІ*, 29.
18. Щербак, Н.П., Артеменко, Г.В., Лесная, И.М., & Пономаренко, А.Н. (2005). *Геохронология раннего докембрия Украинского щита*. К., Наукова думка.
19. Курило, С. І., Степанюк, Л. М., Бобров, О. Б. (2012). Уран-свинцевий ізотопний вік монациту із двослюдяного граніту Мокромосковського масиву. *Мінералогічний журнал*, 34 (1), 63-68.
20. Černý, P., & Ercit, T. S. (2005). The classification of granitic pegmatites revisited. *The Canadian Mineralogist*, 43. doi: <https://doi.org/10.2113/gscanmin.43.6.2005>
21. Phelps, P.R., Lee, C-T.A., & Morton, D.M. (2020) Episodes of fast crystal growth in pegmatites. *Nat Commun*, 11, 4986. doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18806-w>
22. Luo, Y., Shen, P., Cao, C., Feng, H., Li, C., Bai, Y., Suo, Q. (2023). From granite to highly evolved pegmatite: A case study of the Shangkelan rare-metal granite-pegmatite system (Altai, NW China). *Ore Geology Reviews*, 159, 105532. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105532>
23. Zheng, S., Su, J-H., Wang, J, Liu, S-J., & Zhao, X-F. (2025). Origin and evolution of granitic pegmatite rare metal deposits in the northern Mufushan batholith, South China: Insights from muscovite chemistry. *American Mineralogist*, 110 (3). doi: <https://doi.org/10.2138/am-2024-9636>

24. Xiong, Y-Q, Fan, Z-W., Yu, H-Y., Di, H., Cao, Y-H., Wen, C.H., & Jiang, S-Y. (2024). Genetic linkage between parent granite and zoned rare metal pegmatite in the Renli-Chuanziyuan granite-pegmatite system, South China. *GSA Bulletin*, 137 (3-4), 1607–1627. doi: <https://doi.org/10.1130/B37688.1>
25. Есипчук, К. Е., Орса, В.И., & Щербаков, И.Б. (1993). Гранитоиды Украинского щита. Петрохимия, геохимия, рудоносность: справочник. К., Наукова думка.
26. Щербаков И. Б. (2005). Петрологія Українського щита. ЗУКЦ.
27. Le Maitre (ed.). (2005). *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms*. Cambridge University Press. doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535581>
28. Сукач, В.В., Ісаков, Л.В., Безвинний, В.П., Шпильчак, В.О. (2021). Пошуки родовищ рідкісних металів у Східноукраїнській пегматитовій області – важливий складник геологорозвідувальних робіт в Україні. *Мінеральні ресурси України*, (4), 6-15. doi: <https://doi.org/10.31996/mru.2021.4.6-15>

Pegmatites of the Mokromoskovsk granite pluton

Yuliia Lytvynenko

PhD student,

M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy
and Ore Formation of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ABSTRACT

Introduction. The Mokromoskovsky pluton is composed of light gray granites and dark gray granodiorites. Light gray granites are composed of oligoclase (35-40%), microcline (20-25%), quartz (30-35%), and biotite (2-5%). Dark gray granodiorites contain oligoclase (40-55%), microcline (18-20%), quartz (25%), and biotite (5-7%). Light gray granites are microclinized in some areas and have acquired a pink color as a result of post-magmatic metasomatic processes. Muscovite granites containing muscovite in an amount from 1 to 15% are found in the contact zones of the Mokromoskovsky pluton. These rocks have the following mineral composition: oligoclase (35-40%), microcline (20-25%), quartz (30-35%), muscovite (1-15%), and biotite (0-4%).

Materials and Methodology. The classification of pegmatite is based on field observation of pegmatite and description of 54 thin sections. The map was created with QGIS, and the diagram was created with MS Excel. Chemical analyses of granites (15 samples) and pegmatites (6 samples) were conducted at the Research Institute of Chemistry of V.N. Karazin Kharkiv University.

Main Results. Biotite-bearing pegmatites. Zonal pegmatite veins are composed of biotite (30%), quartz (30%), microcline (15%), oligoclase (25%). The next zone is coarse-grained, composed of microcline (15%), oligoclase (15%), quartz (55%) and biotite (5%). The inner zone is composed of quartz and is not present in every zonal vein. Sometimes zonal pegmatites contain a zone of written granite. Azonal pegmatites are composed of coarse grains of oligoclase, microcline, quartz, and biotite. Muscovite-bearing pegmatites. Zonal veins include three zones: an outer zone of pegmatoid granite of muscovite-quartz-microcline composition; a subsequent zone of written granite; an inner zone of blocky pegmatite of quartz-microcline composition. Azonal pegmatites are composed of coarse grains of oligoclase, albite, microcline, quartz, and muscovite. The muscovite content reaches 30%.

Conclusions. Two types of pegmatite veins have been identified - biotite-bearing and muscovite-bearing. Muscovite pegmatites occur in the southern, southeastern, and southwestern contact zone of the Mokromoskovsk pluton. Biotite pegmatites are encountered in the central part of the pluton. In the southern and southwestern contact zone, pegmatite veins are encountered in host rocks and form the Mokromoskovsky pegmatite field. Zonal and azonal pegmatite veins have been identified. Biotite-containing pegmatites consist of biotite, microcline, quartz, and oligoclase. Muscovite-containing ones contain muscovite, microcline, quartz, oligoclase, albite. Zonal and azonal pegmatite veins have been discovered; azonal veins intersect zonal veins. In the muscovite pegmatite veins of the Mokromoskovsky pegmatite field, high contents of tantalum, niobium, lithium, beryllium, rubidium, cesium, and sometimes rare earth metals have been discovered.

Keywords: Zaporizhia region, Mokromoskovsky granite pluton, pegmatite, pegmatite vein, granite.

References

1. Orsa, V. I. (1973). *Petrology of the granite-gneiss complex of the Middle Dnieper*. K., Naukova dumka.
2. Orsa, V. I. (1988). *Granite formation in the Precambrian of the Middle Dnieper granite-greenstone region*. K., Naukova Dumka.
3. Semenenko, N. P. (1949) *Structure of the crystalline massif of the Middle Dnieper*. Publishing House of the Science Academy of the USSR.
4. Tkachev, O. O. (1937). *The petrology of granites of the crystalline belt (section of the Mokromoskovsk batholith)*. *Geological magazine*, 4 (1), 117-144. [in Ukrainian]
5. Usenko, I. S., Orsa, V. I., Khatuntseva, A. Y., & Tsukanov, V. O. (1973). *Geosynclinal granitoids of the Ukrainian shield*. *Geological journal*, 33 (1), 3-13. [in Ukrainian]

6. Shcherbakov, I. B., Esypchuk, K.E., & Orsa, V. I. (1984). *Granitoid formations of the Ukrainian shield*. K., Naukova dumka.
7. Berzenin, B.Z., & Kychurchak, V.M. (1978). *Petrology of the Mokrososk massif*. Geological journal, 38 (5), 132-135.
8. Rudenko, L.G. (ed.) (2007). *National Atlas of Ukraine, Kartohrafiia*. [in Ukrainian]
9. Berzenin B.Z., Bobrov, A. B., & Kychurchak, V. M. (1981) *Physico-chemical conditions of the formation of rare-metal pegmatites of the Middle Dnieper region*. Geochemistry and ore formation, 9, 63-66.
10. McCaffrey D. M., Jowitt, S. M. (2023). *The crystallization temperature of granitic pegmatites: The important relationship between undercooling and critical metal prospectivity*. Earth-Science Reviews, 244. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104541>
11. Petrenko, A.A., Shpilchak, V.O., & Nekryach, A.I. (2004). *State Geological Map of Ukraine, scale 1:200,000, sheets L-36-VI (Zaporizhzhia), L-37-I (Pologi)*. UkrDGRI. [in Ukrainian]
12. Shpilchak, V.O., Manyuk, V.V., Sukach V.V., & Nekryach, A.I. (2007). *State Geological Map of Ukraine, scale 1:200,000, sheet: M-36-XXXVI (Dnipropetrovsk)*, UkrDGRI. [in Ukrainian]
13. Isakov, L. V. (2006). *Geological and structural features of the Middle Dnieper megablock and its prospects for rare-metal pegmatites*. Geological-minerological Bulletin of the Kryvyi Rih National University, 16 (2), 73–79. [in Ukrainian]
14. Isakov, L. V., & Bobrov, O. B. (2007). *Pegmatite fields of the Middle Dnieper pegmatite region and the main geological factors of their formation*. //Collection of scientific papers of the UkrDGRI, (3), 35–45. [in Ukrainian]
15. Isakov, L. V., Bestuzhev, O. M., Kuz, V. D., & Shurko, M. M. (2008). *Structural position and structure of the Mokromoskovsk pegmatite field (Middle Dnieper megablock)*. Collection of scientific papers of the UkrDGRI, (1), 40–49. [in Ukrainian]
16. Stepanyuk, L.M., & Kurylo, S.I. (2019). *Geochemistry of difeldspar granitoids of the middle Dnieper region*. K., Naukova Dumka. [in Ukrainian]
17. Esypchuk, K. Y., Bobrov, O. B., & Stepaniuk, L. M. (2004). *Correlational chronostratigraphic scheme of the early Precambrian of the Ukrainian Shield (scheme and explanatory note)*. UkrDGRI, 29. [in Ukrainian]
18. Shcherbak N.P., Artemenko G.V., Lesnaya I.M., & Ponomarenko A.N. (2005). *Geochronology of the Early Precambrian of the Ukrainian Shield*. K., Naukova Dumka.
19. Kurilo, S. I., Stepaniuk, L. M., Bobrov, O. B. (2012). *Uranium-lead isotopic age of monazite from two-mica granite of the Mokromoskovsk massif*. Mineralogical Journal, 34 (1), 63–68. [in Ukrainian]
20. Černý, P., & Ercit, T. S. (2005). *The classification of granitic pegmatites revisited*. The Canadian Mineralogist, 43. doi: <https://doi.org/10.2113/gscanmin.43.6.2005>
21. Phelps, P.R., Lee, C-T.A., & Morton, D.M. (2020). *Episodes of fast crystal growth in pegmatites*. Nat Commun, 11, 4986. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18806-w>
22. Luo, Y., Shen, P., Cao, C., Feng, H., Li, C., Bai, Y., Suo, Q. (2023). *From granite to highly evolved pegmatite: A case study of the Shangkelan rare-metal granite–pegmatite system (Altai, NW China)*. Ore Geology Reviews, 159, 105532. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105532>
23. Zheng, S., Su, J-H., Wang, J, Liu, S-J., & Zhao, X-F. (2025). *Origin and evolution of granitic pegmatite rare metal deposits in the northern Mufushan batholith, South China: Insights from muscovite chemistry*. American Mineralogist, 110 (3). doi: <https://doi.org/10.2138/am-2024-9636>
24. Xiong, Y-Q, Fan, Z-W., Yu, H-Y., Di, H., Cao, Y-H., Wen, C.H., & Jiang, S-Y. (2024). *Genetic linkage between parent granite and zoned rare metal pegmatite in the Renli-Chuanziyuan granite-pegmatite system, South China*. GSA Bulletin, 137 (3-4), 1607–1627. doi: <https://doi.org/10.1130/B37688.1>
25. Esipchuk, K. E., Orsa, V.I., & Shcherbakov, I.B. (1993) *Granitoids of the Ukrainian Shield. Petrochemistry, geochemistry, ore-bearing: a reference book*. K., Naukova dumka.
26. Shcherbakov, I. B. (2005). *Petrology of the Ukrainian Shield*. Lviv: ZUKC. [in Ukrainian]
27. Le Maitre (ed.) (2005). *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms*. Cambridge University Press. doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535581>
28. Sukach, V.V., Isakov, L. V., Bezvinny, V. P., & Shpilchak, V. O. (2021). *Search for rare metal deposits in the East Ukrainian pegmatite region is an important component of geological exploration work in Ukraine*. Mineral resources of Ukraine, (4), 6-15. <https://doi.org/10.31996/mru.2021.4.6-15>. [in Ukrainian]

Received 12 March 2025

Accepted 30 April 2025

Стратиграфія юрської системи району села Кам'янка. Частина 3. Підлужна світа

Андрій Матвєєв¹

д. геол. н., доцент,

¹ Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, Україна,

e-mail: matveev@karazin.ua,  <https://orcid.org/0000-0002-2600-6529>;

Олена Шевчук^{2, 3}

д. геол. н., пров. наук. співробітник,

² Центр палеогенетики, Стокгольмський університет, Стокгольм, Швеція,

³ Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна,

e-mail: hshvchuk@ukr.net,  <http://orcid.org/0000-0001-7221-4540>

Стаття присвячена дослідженню підлужної світи юрської системи Північно-Західної околиці Донецької складчастої споруди. Встановлений її речовинний склад та особливості його зміни по розрізу та по площі в межах околиць с. Кам'янка, що на південній Ізюмщині. Дослідження включало аналіз літературних даних та результатів картування, а також власні спостереження. Проведено палеонтологічний, в тому числі вперше детальний палінологічний аналізи, та узагальнені дані про поширення всіх викопних решток, що були встановлені в підлужній світі. В статті зведені всі попередні палеонтологічні дані науковців та доповнено власними дослідженнями. Загалом це – брахіоподи, головоногі молюски, черевоногі молюски, двостулкові молюски, малакостраки, остракоди, форамініфери, кутикули та трахеїди деревини, рештки прازیнофітових та динофітових водоростей, акритархи та спори і пилок вищих рослин. Підлужна світа, в межах дослідженої території, представлена досить одноманітними глинами. Глини гідрослюдисті з незначною домішкою монтморіллону та каоліну. Колір глин темно-сірий місцями з блакитним відтінком. Глини містять карбонатні (сидеритові та кальцитові) конкреції. Палеонтологічні залишки зустрічаються часто і по всьому розрізу світи. Представлені морськими групами, в тому числі важливими з точки зору стратиграфії. Встановлені зони за амонітами *Garantiana garanti*, *Parkinsonia parkinsoni* та лона *Pseudocoscoceras michalskii*, що дозволяє впевнено датувати відклади верхнім байосом – нижнім батом. Характерною ознакою байосу є домінування папоротеподібних *Dictyophyllidites* та поява *Neoraistrickia rotundiformis*, *Duplexisporites anagrammensis*, *Converrucosisporites disparituberculatus*, *Laevigatosporites ovatus*, *Leptolepidites major*, *Densoisporites velatus* та пилку голонасінних *Callialasporites dampieri*, *Araucariacites australis*, *Vitreisporites pallidus*. Поява більшої кількості родів плавунів, вужачкових та ін. *Foveosporites*, *Klukisporites*, *Lycopodiacidites* та *Uvaesporites*, а також папоротеподібних *Clathropteris obovata* var. *magna* та домінування *Concavisporites* вирізняє батські відклади. Формування світи припадає на максимум середньо-пізньоярської трансгресії з нормально морськими умовами накопичення осаду, продовжуються диференційовані тектонічні рухи локальних структур.

Ключові слова: юрська система, підлужна світа, Північно-Західний Донбас, стратиграфія, літологія, палеонтологічні рештки.

Як цитувати: Матвєєв Андрій, Шевчук Олена (2025). Стратиграфія юрської системи району села Кам'янка. Частина 3. Підлужна світа. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», (62), 72-84. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-05>

In cites: Matveev Andriy, Shevchuk Olena (2025). Jurassic system stratigraphy at the Kamianka village. Part 3. The Pidluzhna formation. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (62), 72-84. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-05> [in Ukrainian]

Вступ. Ця стаття є продовженням низки публікацій, присвячених стратиграфії юрських відкладів одного з ключових в цьому відношенні районів північно-західного Донбасу – околиць с. Кам'янка та м. Ізюм. Стан проблеми та аналіз попередніх робіт приведені нами у першій статті [16].

Підлужна світа складена майже виключно темно-сірими глинами та не представлена на великих відслоненнях. Час формування її припадає на пізній байос – ранній бат та добре обґрунтований палеонтологічними залишками.

Аналіз попередніх публікацій.

В схемі О.О. Борисяка 1917 року, відклади підлужної світи входять в єдину піскувато-глинисту світу, яка відповідає всій середній і частині верхньої юри. Вперше ця світа виділена Л.Ф. Лунгєрс-

гаузенем у 1941 році [12] та описана у 1942 році [13], ним відмічається однорідність літологічного складу та дещо різний характер відкладів в зонах відносного підняття та прогинання.

В подальшому ці відклади в ранзі світи не розглядались, а відносились до об'єднаних верхнього байосу – нижнього бату.

Нарешті, в узагальнювальній монографії 2013 року [6] вони знов описані в ранзі світи, втім нових даних не наведено, а опис досить схематичний.

Відклади байосу на території ДДЗ за допомогою спорово-пилкового аналізу були стратифіковані К.В. Семеновою [19], Г.В. Шрамковою [28] в ранзі ярусу. О.А. Шевчук доповнено новими даними, включаючи спорово-пилковий аналіз та вивчення інших мікрофосилій, а також вперше вста-

новлені біозональні підрозділи за диноцистами безпосередньо підлужної світи ДДЗ [21, 24-26, 30-33]. Паліноморфи рослинного походження з юрських відкладів, такі як кутикули та трахеїди були описані раніше на території України включно з ДДЗ та на території Донбасу [22-23].

Матеріал та методи. Підлужна світа має широке поширення на Кам'янській площі але оскільки складена вона переважно глинами, більш менш значні її відслонення відсутні. Самі нижні відклади світи відслонюються в колишньому хуторі Підлужний (вул. Заслонова, м. Ізюм). Більш повне відслонення є в яру в с. Суха Кам'янка, який простягається північніше дороги на с. Яремівку. Також ці відклади були відкриті свердловиною 6730, північніше с. Мала Комишуваха (рис. 1).

Нами були проаналізовані дані, отримані під час картувальних та пошукових робіт різного масштабу, які проводились в районі с. Кам'янка, а

також узагальнені відомості з власних зборів та літературних даних про знахідки викопних решток.

Також, проведено мацерацію досліджених порід в лабораторії Інституту геологічних наук НАН України за стандартною методикою первинної обробки зразків на палінологічний аналіз.

Результати та обговорення. Підлужна світа виділена Л.Ф. Лунгенсгаузенем у 1941 році, стратотип вказаний не був, ймовірно це виходи темно-сірих глин біля хутора Підлужний (зараз в межах м. Ізюм). Нажаль, стратотипова місцевість зараз знаходиться під міською забудовою і відслонюються лише її невеличкі фрагменти. В якості неостратотипу можна вказати відслонення світи біля с. Суха Кам'янка, в яру, який простягається на північ паралельно дорозі Суха Кам'янка – Яремівка. Поширена як в ДДЗ, так і на північно-західній окраїні Донбасу.

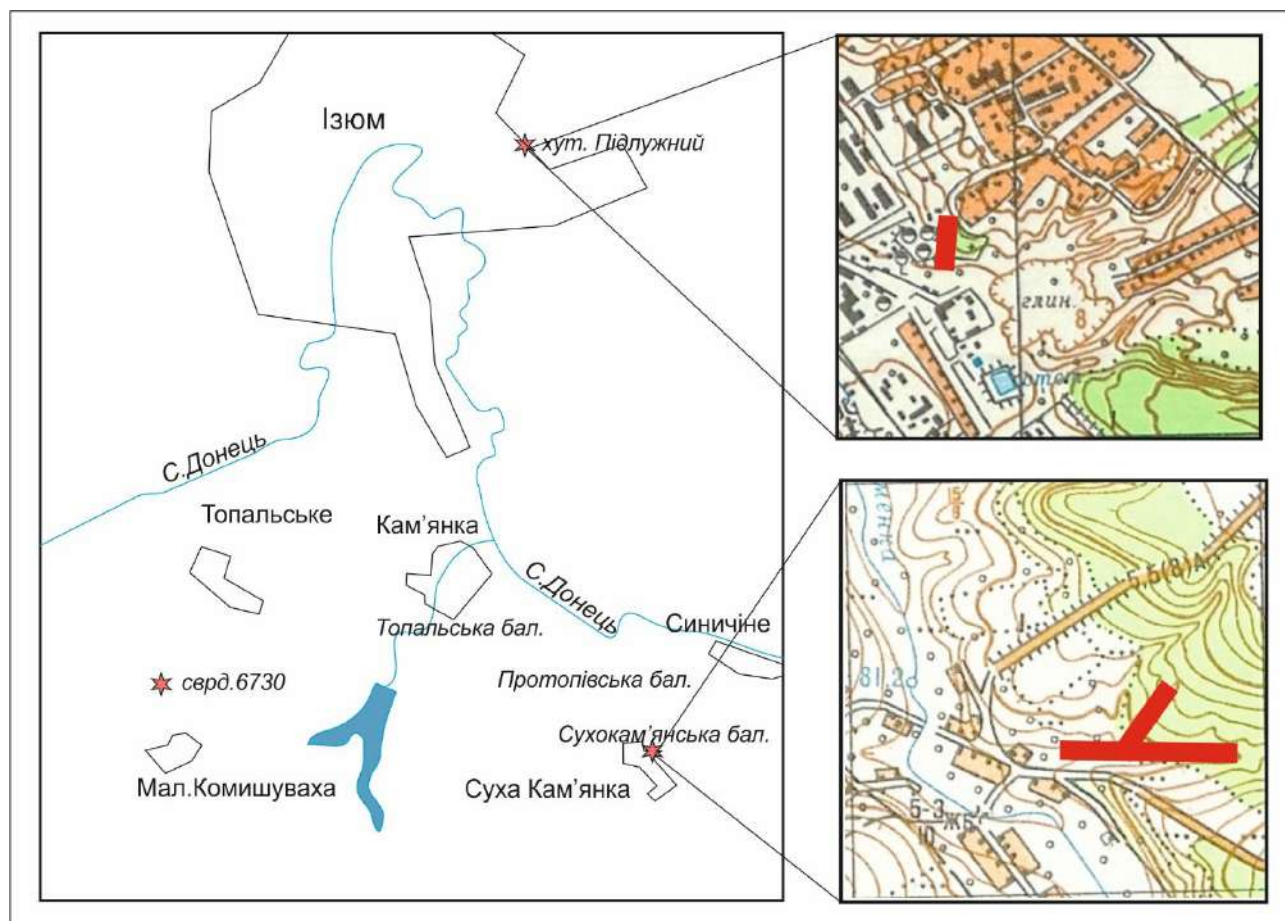


Рис. 1. Схема розміщення досліджених розрізів / Fig. 1. Scheme of placement of the investigated sections

Літологія. Літологічний склад підлужної світи детально досліджений Г.В. Карповою та В.Г. Космачовим [11]. Основна, глиниста, частина світи складена гідрослюдами з незначною домішкою мінералу монтморілонітової групи та каоліну. Глини мають переважно однорідну текстуру але зустрічаються і шаруваті текстури. Колір переважно темно-сірий іноді з блакитним відтінком.

В товщі глин, особливо в їх нижній частині зустрічаються карбонатні конкреції еліпсоподібної форми до 1,2 м діаметром. Складені вони сидеритом або кальцитом. Зазвичай в горизонтах концентрації конкрецій та в самих конкреціях зустрічаються залишки та відбитки макрофауни.

В верхній частині світи збільшується вміст піскуватого матеріалу до появи лінз глинистого

пісковнику та алевроліту. Важка фракція уламкової складової глин складається з циркону, турмаліну, епідоту, дістену, ставроліту, гранату, рутілу. Вперше в юрських відкладах кам'янської площі з'являється рогова обманка, яка складає до 6-7% всієї важкої фракції [7].

Палеонтологічні рештки. В кінці байосу вперше в юрському періоді на території північно-західного Донбасу встановлюється нормально-морський режим. Втім, при суттєвому зростанні, порівняно з козулинським та черкаським часом,

біорізноманіття, кількість збережених решток відносно невелика. Залишки макрофауни представлені переважно у вигляді відбитків. Найкраща збереженість притаманна залишкам в сидеритових конкреціях, але далеко не у всіх конкреціях залишки зустрічаються. Мікрофауна зустрічається по всій товщі в невеликій кількості.

Спори та пилок вищих рослин. Палінологічні комплекси з відкладів підлужної світи району Кам'янки (рис. 2-5.) характеризуються послідовними типовими байоським та батським спорово-пил-

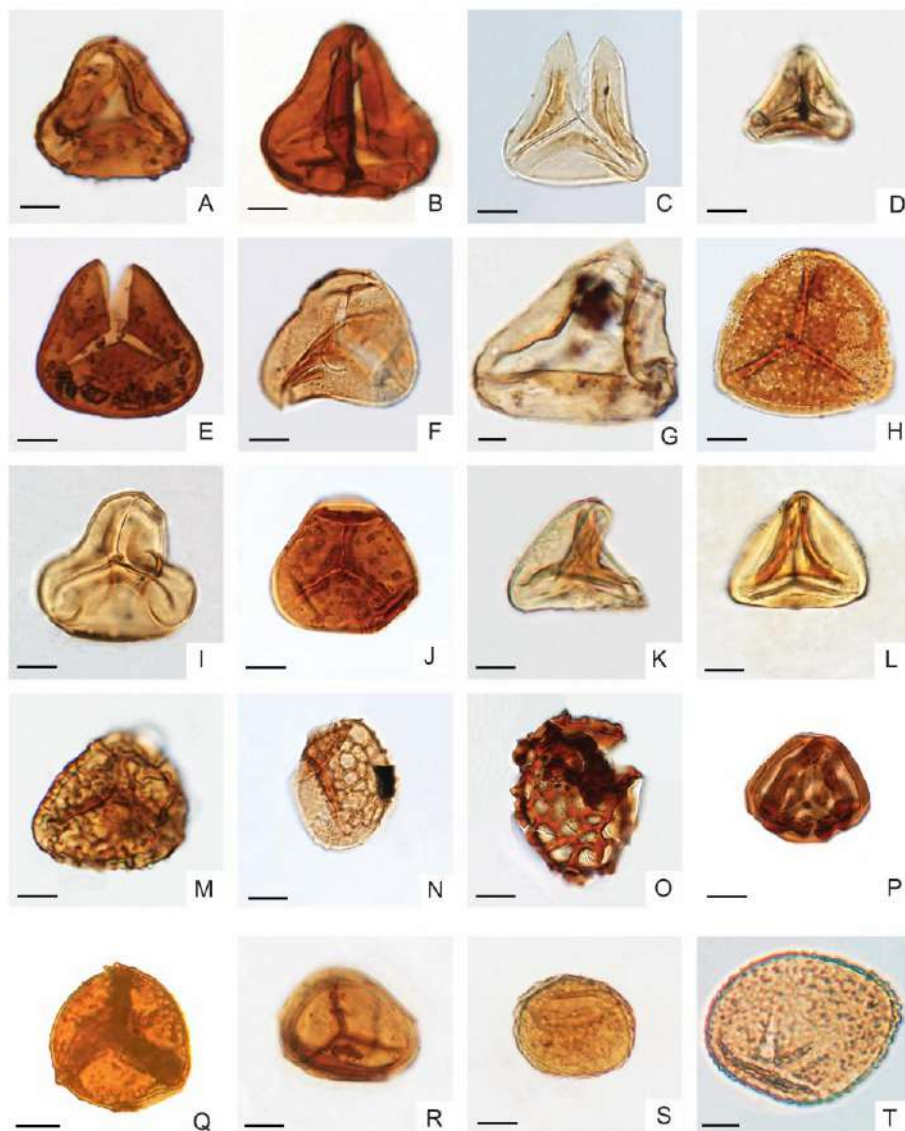


Рис. 2. Спори вищих рослин з відкладів підлужної світи північно-західної окраїни Донбасу.

- A.** *Converrucosporites disparituberculatus* Vin. (байос). **B.** *Matonisporites phlebopteroides* Coup. (байос). **C.** *Matonisporites elegans* Hunt (бат). **D.** *Clathropteris obovata* var. *magna* Tur.-Ket. (бат). **E.** *Cyathidites australis* Coup. (байос). **F.** *Cyathidites asper* (Bolch.) Dett. (бат). **G.** *Cyathidites mesozoicus* (Thiergart) Potonie (байос). **H.** *Foveosporites pseudoalveolatus* (Coup.) M. Voronova (бат). **I.** *Concavisporites* sp. (бат). **J.** *Concavisporites junctum* (K.-M.) Semenova (бат). **K.** *Dictyophyllidites mortonii* (de Jersey) Playford & Dettmann (байос). **L.** *Dictyophyllidites vulgaris* (Mal.) Semenova (байос). **M.** *Retitriletes cerniidites* (Ross.) Sem. (бат). **N.** *Retitriletes austroclavatidites* (Cookson) Doring et al. in Krutzsch (бат). **O.** *Retitriletes rotundus* (K.-M.) Semenova (бат). **P.** *Duplexisporites anagrammensis* (Kara-Murza) Playford & Dettmann (байос). **Q.** *Biretisporites* sp. (байос). **R.** *Hymenozonotriletes* sp. (байос). **S.** *Laevigatosporites ovatus* Wilson & Webster (байос). **T.** *Osmundacidites wellmanii* Couper. (байос) /

Fig. 2. Spores of higher plants from the sediments of the Pidluzhna formation of the northwestern outskirts of Donbas

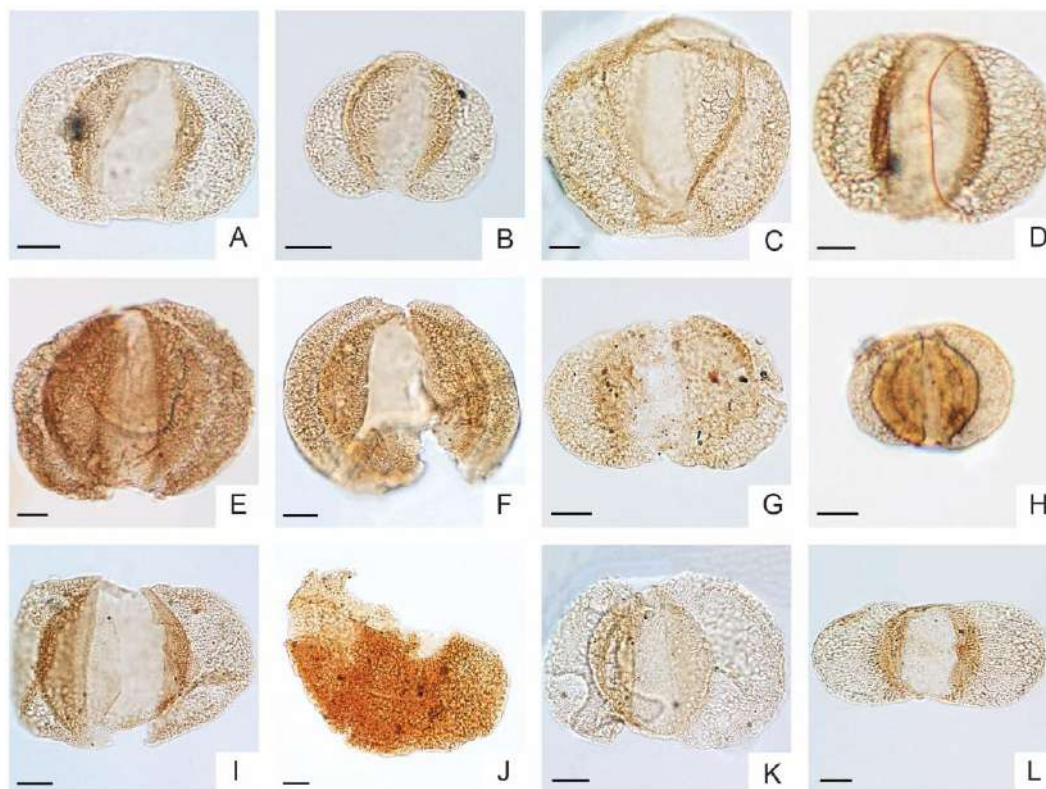


Рис. 3. Мішковий пилок голонасінних з відкладів підлужної світи північно-західної окраїни Донбасу.

A. *Alisporites australis* De Jersey (байос). **B.** *Alisporites similis* (Balme) Dettmann (бат). **C.** *Piceapollenites* sp. (бат). **D.** *Alisporites robustus* Nilsson (байос). **E.** *Parvisaccites* sp. (байос). **F.** *Parvisaccites* sp. (бат). **G.** *Protopinus* sp. (байос). **H.** *Protopinus subluteus* Bolch. (байос). **I.** *Podocarpidites* sp. (байос). **J.** *Quadraeculina* sp. (байос). **K.** *Podocarpidites major* Couper (байос). **L.** *Podocarpidites* sp. (бат) /

Fig. 3. Gymnosperm (saccate conifer) pollen from the sediments of the Pidluzhna formation of the northwestern outskirts of Donbas

ковими комплексами, поодинокими диноцистами та іншими мікрофосиліями.

Встановлений байоський спорово-пилковий комплекс представлений спорами, що становлять 66%, пилом голонасінних рослин – 31%, інші – 3%. Спори належать мохоподібним, плавунам, хвощам і папоротепоподібним. Зафіксовано значну участь спор *Dictyophyllidites* spp. (*Dictyophyllidites vulgaris* (Mal.) Semenova, *Dictyophyllum rugosum* (Linaley and Hutter) emend. Krutch, *Dictyophyllidites mortonii* (de Jersey) Playford & Dettmann та інші). Постійно наявні види, що мають широкий діапазон розвитку в юрі – *Cyathidites* spp., *Marattisporites* sp., *Biretisporites* sp., *Hymenozonotrites* sp. Трапляються спори родин *Gleicheniaceae*, *Matoniaceae*, поодинокі спори родини *Dicksoniaceae* – *Concavisporites* sp. Спори плаунових, ужовникових та селягінелієвих трапляються постійно, але в незначній кількості: *Ophioglossum* sp., *Selaginella* sp., *Leptolepidites* sp., *Densosporites velatus* Weyland and Krieger, *Osmundacidites jurassicus* (К.-М.) Kuz. Найхарактерніша ознака для спектрів байосу – наявність спор *Neoraistrickia rotundiformis* (К.-М.) Taras (2 %). Встановлено спори *Duplexisporites anagrammen-*

sis (Kara-Murza) Playford & Dettmann, *Laevigatosporites ovatus* Wilson & Webster, *Converrucosporites disparituberculatus* Vin., що характерні для байоських паліноспектрів. Виявлено форми, зачислені до штучної класифікації груп: *Leiotriletes* sp. та *Trachytriletes* sp. Типовими для середньоюрських спектрів є спори *Lygodioisporites perverrucatus* Couper (рис. 2). Серед голонасінних значний відсоток становить пилок голонасінних, близьких до сучасних родини *Pinaceae* (*Protopinus* sp., *Pseudopicea* sp.), поодинокі *Podocarpaceae* (*Podocarpidites* spp.). Також встановлено пилок хвойних нез'ясованого систематичного положення: *Quadraeculina* sp. (рис. 3). Одноборозні пилкові зерна голонасінних представлені: *Callialasporites dampieri* (Balme) Sukh Dev., *Chasmatosporites elegans* Nilsson, *Eucomiidites troedssonii* (Erdtmann) Pot., *Monosulcites minimus* Cookson, *Cycadopites* sp., *Equisetites variabilis* Vin., *Cerebropollenites macroverrucosus* Schulz, *C. mesozoicus* Nilsson. Також часто трапляється пилок родин *Ginkgoaceae*, *Aracariaceae* значно менше пилку *Cupressaceae*, поодинокі екземпляри пилку *Classopollis* sp. (рис. 4).

Празиофіти. У досліджених зразках з відк-

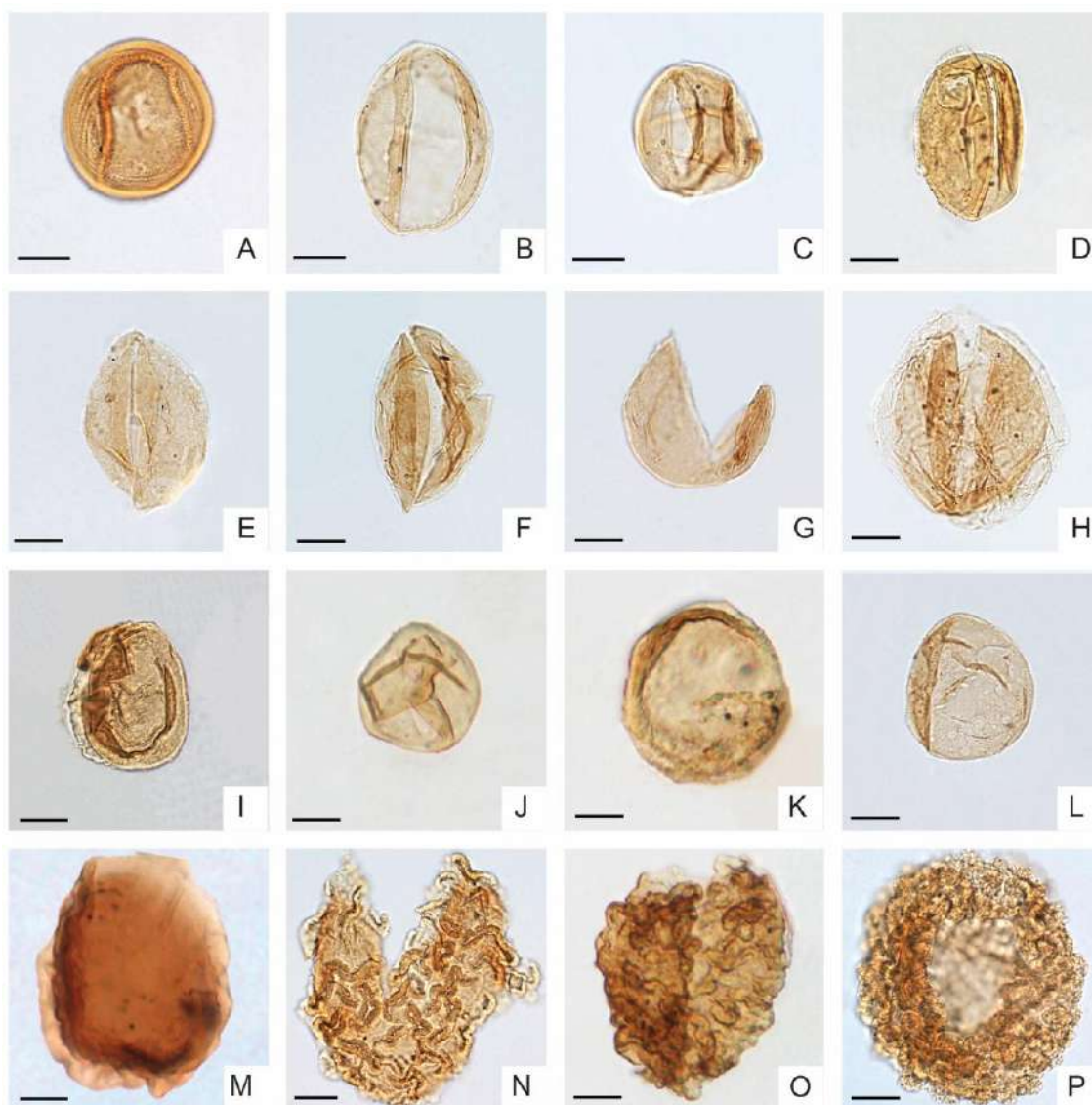


Рис. 4. Однобороздний пилок голонасінних з відкладів підлужної світи північно-західної окраїни Донбасу. **A.** *Classopollis* cf. *classoides* Pflug emend. Pocock et Jansonius (бат). **B.** *Chasmatosporites elegans* Nilsson (байос). **C.** *Eucomiidites troedssonii* (Erdtmann) Pot. (байос). **D.** *Monosulcites minimus* Cookson (байос). **E-F.** *Cycadopites* sp. (байос). **G.** *Taxodiaceapollenites hiatus* (Potonie) Kremp (бат). **H.** *Perinopollenites elatoides* Couper (бат). **I.** *Jiaohepollis flexuosus* Miao (бат). **J.** *Equisetites variabilis* Vin. (байос). **K.** *Araucariacites australis* Cookson (байос). **L.** *Inaperturopollenites dubius* (Potonie et Venitz) Thomson et Pflug. (бат). **M.** *Callialasporites dampieri* (Balme) Sukh Dev. (байос). **N.** *Cerebropollenites macroverrucosus* Schulz (байос). **O.** *Cerebropollenites macroverrucosus* Schulz (бат). **P.** *Cerebropollenites mesozoicus* Nilsson (байос) /

Fig. 4. Monosulcate gymnosperm pollen from the sediments of the Pidluzhna formation of the northwestern outskirts of Donbas

ладів підлужної світи виявлено рештки зелених водоростей *Tasmanites* spp. та поодинокі акри-тархи - *Micrhystridium fragile* Defl. [27] (рис. 5).

Кутикули, трахеїди. Систематичне положення встановлених дисперсних кутикул можна пов'язати з такими крупними таксономічними одиницями як гінкгові, цикадові, хвойні і ін. Максимальний розмір фрагментів кутикул близько 150 мкм. Досліджена нами лінготафофлора – трахеїди, що встановлені в байоських відкладах (переважно глинистих прошарках) виявились переваж-

но темними фрагментами, що можливо були облямовані смолою (рис. 5).

Встановлений батський спорово-пилковий комплекс представлений спорами, що становлять 68 %, пилом голонасінних рослин – 29 %, інші – 3 %. Спори належать мохоподібним, плавунам, хвощам і папоротеподібним. Серед спор домінують *Coniopteris* sp., *Cyathidites australis* Coup. *Cyathidites asper* (Bolch.) Dett., дещо менше в порівнянні з байоським комплексом *Biretisporites* sp., *Dictyophyllum* sp. Збільшується участь плавунів

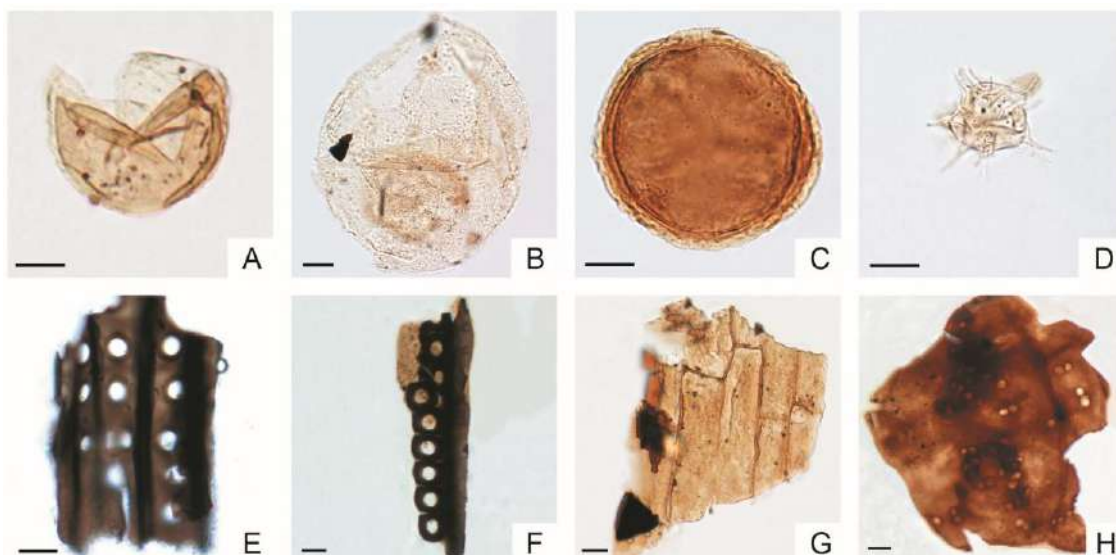


Рис. 5. Мікрофосилії з відкладів підлужної світи північно-західної окраїни Донбасу. А. Dinocyst - *Kallosphaeridium* sp. (бат). В. Dinocyst - *Trichodinium* sp. (бат). С. *Tasmanites* sp. (байос). D. Acritarchs - *Micrhystridium fragile* Defl. (байос). E-F. Tracheids (байос). G. Cuticle - адаксіальна кутикула (бат). H. Cuticle - абаксіальна кутикула (байос) /

Fig. 5. Microfossils from the sediments of the Pidluzhna formation of the northwestern outskirts of Donbas

Neoraistrickia rotundiformis (К.-М.) Taras., *Retitriletes austroclavatidites* (Cookson) Doring et al. in Krutzsch, *Retitriletes cerniidites* (Ross.) Sem., *Retitriletes rotundus* (К.-М.) Semenova. У незначній кількості наявні спори родини Gleicheniaceae - *Gleicheniidites laetus* (Bolch.) Bolch, *Plicifera delicata* (Bolch.) Bolch. Встановлені *Clathropteris obovata* var. *magna* Tur.-Ket., які є характерними для батських спорово-пилкових комплексів. Трапляються поодинокі екземпляри *Matonisporites phlebopteroides* Coup. *M. elegans* Hunt, *Concavisporites junctum* (К.-М.) Semenova, *Osmundacidites* sp., *Densoisporites* sp., *Sellaginella sanguinolentiformis* Sach. and Iljina, *Foveosporites pseudoalveolatus* (Coup.) M. Voronova. Відмічені спори нез'ясованого систематичного положення *Calamospora mesozoica* Coup. (рис. 2). Серед голонасінних переважають *Alisporites* spp., *Pinuspollenites* sp., *Piceapollenites* sp., *Parvisaccites* sp. та пилок давніх представників *Protopinus* sp., *Protopinus sublutus* Bolch. [33]. Постійно наявні пилкові зерна рослин родини Podocarpaceae. Характерним є пилок одноборозного типу *Quadraeculina* sp., *Taxodiaceapollenites hiatus* (Potonie) Kremp., *Perinopollenites elatoides* Couper, *Araucariacites australis* Cookson, *Jiaohepollis flexuosus* Miao, *Inaperturopollenites dubius* (Potonie et Vennitz) Thomson et Pflug. Збільшена участь порівняно з байоськими спектрами, гінгових, кипарисових та бенетитових, а хейролепідієвих встановлено поодинокі екземпляри - *Classopollis* cf. *classoides* Pflug emend. Pockert Jansonius (до 2%).

Диноцисти. У верхніх верствах підлужної світи встановлені поодинокі диноцисти, що

представлені *Kallosphaeridium* sp., *Batiacasphaera* sp. та *Trichodinium* sp., які є транзитними формами та не мають важливого стратигричного значення.

Кутикули, трахеїди. Проведено порівняння нових даних, які висвітлені в цій статті і охоплюють район Кам'янки (північно-західна окраїна Донбасу) містять рештки дисперсних кутикул та трахеїд, що зустрічаються по всій території України в одновікових байос-батських відкладах, в основному це фрагменти гінгових, цикадових та хвойних. У палинокомплексах байоського віку фрагменти покрівної тканини листя вищих рослин (кутикул) та мікроскопічні фрагменти провідної тканини деревини (трахеїди) становлять 10%, вміст спор та пилку вищих рослин 90%. У палинокомплексах батського віку таке співвідношення відповідно 15 та 85%.

Форамініфери. Нажаль, монографічне дослідження цієї надважливої групи, також як і остракод, для юрських відкладів Донбасу не проводилось. Низка робіт О.К. Каптаренко-Чорноусової [8-10] присвячена дослідженню окремих груп або стратиграфічним дослідженням в Дніпровсько-Донецькій западині, роботи М.І. Бланка [1] – опису нових видів. Список видів форамініфер наведений лише в роботі [20]. У відкладах підлужної світи були зустрінуті: *Ammodiscus baticus* Dain, *A. crassus* (Kubeler et Zwingli), *A. infimus* (Strikland), *A. varians* Kaptarenko, *Haplophragmoides canariensis* (Orb.), *Trochammina squamataformis* Kaptarenko, *Ophthalmidium infraoolithicum* (Terquem), *Nodosaria fontinensis* Terquem, *N. metensis* Terquem, *N. prima* Orb., *Lagena bradyi*

Kaptarenko, *L. stutzeri* Franke, *Fronicularia lignaria* Terquem, *F. nodosaria* Terquem, *Foolithica* Terquem, *F. spatulata* Terquem, *F. varians* Terquem, *Lenticulina alfa* Blank, *L. angulata* (Kaptarenko), *L. atheria* Dain, *L. biexcavata* (Mjatluk), *L. centralis* (Terquem), *L. incurvare* Gerke, *L. interrumpa* Blank, *L. irregularia* (Blank), *L. oreliensis* Blank, *L. perlucida* Blank, *L. polygonata* (Franke), *L. polymorpha* (Terquem), *L. primarea* Blank, *L. pulchella* Kaptarenko, *L. salva* Kaptarenko, *L. subinvoluta* Kaptarenko, *L. umbonata* Kaptarenko, *L. varians* (Bornemann), *L. variabilis* Kaptarenko, *L. volganica* (Dain), *L. volubilis* Dain, *Astacolus bicostatus* (Deecke), *A. dainae* (Kosyrev), *A. obesus* (Kaptarenko), *A. subradiatus* (Kaptarenko), *Planularia anceps* (Terquem), *P. arietis* (Issler), *P. breoni* (Terquem), *P. compta* Kaptarenko, *P. delicatula* Kaptarenko, *P. instabilis* (Terquem), *P. semiinvoluta* (Terquem), *P. tricarina* (Reuss), *Marginulina deslongchampsii* Terquem, *M. pergrala* Kaptarenko, *M. senilis* Terquem, *Dentalina pseudocommunis* Franke, *D. vasta* Franke, *Vaginulina metensis* Terquem, *V. praemucronata* Kaptarenko, *V. simplex* Terquem, *Citharinella instabilis* (Kaptarenko), *Globulina oolithica* (Terquem), *Garantella asterigerinoides* Kaptarenko, *G. floscula* Kaptarenko, *G. marginata* Kaptarenko, *G. rudia* Kaptarenko, *G. stellata* Kaptarenko, *Epistomina peregrina* Kaptarenko, *Lamarcella epistominoides* Kaptarenko, *L. incrassata* Kaptarenko, *L. perforata* Kaptarenko, *L. plana* Kaptarenko, *Pseudolamarckina lamellose* (Kaptarenko), *P. marmorea* (Dain), *Spirillina ukrainica* Kaptarenko, *Trocholina nana* Kaptarenko.

Остракоди. Дані по систематичному складу остракод наведені в роботі Любімової П.С. [14] їх стратиграфічне поширення досліджувалось Пермською М.М. [18]. Поширені вони переважно у вигляді окремих поодиноких мушель. Представлені наступними видами: *Cytherella limpida* Blaszyk, *C. oblonga* Permjakova, *C. perennis* Blaszyk, *Paracypris bajociana* Bate, *Monoceratina amygdaliformis* Blaszyk, *Homocytheridea ovalis* (Lubimova), *Ljubimovella pariformis* Malz, *Balowellia attendens* (Lubimova), *B. pteriformis* (Blaszyk), *Paranotacythere monocarinata* (Permjakova), *Schuleridea krasnopavlovkaensis* Permjakova, *Progonocythere? posteriohumilis* Blaszyk, *Glyptocythere aspera* (Habarova), *G. concentrica* Brand et Malz, *G. crassicostata* Permjakova, *G. losoviensis* Permjakova, *G. multa* Permjakova, *G. regulariformis* Brand et Malz, *G. tuberodentata* Brand et Malz, *Fuhrbergiella postsauzei* Permjakova, *Pleurocythere impar* Triebel, *P. regularis* Triebel, *P. richteri* Triebel, *Palaeocytheridea laevis* Permjakova, *P. rara* Permjakova, *P. subtilis* Permjakova, *Naviculina longa* Lubimova, *Procytheridea bajociensis* (Habarova), *P. concinna* Permjakova, *P. szestoch-*

wiensis Blaszyk, *P. kaptarenkae* Permjakova, *P. ljubimovae* Permjakova, *P. tricostrata* (Habarova), *P. ukrainica* Permjakova, *Southcavea concentrica* Permjakova, *S. puncticulata* Permjakova, *Cytherop-teron tenuis* Blaszyk.

Малакостраки. В керні свердловини 6730 з глибини 118-126 м, разом з *Parkinsonia parkinsoni* зустрінуто відбиток середнього ступеню збереженості ракоподібного *Francocaris* cf. *grimmii* Broili, описаного з юрських відкладів Німеччини (рис. 6.1).

Двостулкові молюски. Найбільш поширена група викопних решток була описана в серії монографій О.О. Борисяка [2-4]. В підлужних глинах ним встановлені: *Meliagrinnella doneziana* (Boriss.), *Isodonta* cf. *buvignieri* T. Et J., *Astarte* sp., *Gresslya* sp., *Pecten* sp., *Nucula eudorae* d'Orb., *N. sana* Bor., *N. lola* Bor., *N. kowalewskensis* Bor., *N. maga* Bor., *N. cf. subovalis* Goldf., *N. symmetrica* Bor., *N. circuliformis* Bor., *Leda diana* d'Orb., *Macrodon verevkinense* Bor., *M. jakovlevi* Bor., *M. kowalevskense* Bor., *Cucullaea corallina* Damon., *C. goldfussi* Rom., *C. oblonga* Goldf., *Dicranodonta* sp., *Modiola tulipaea* Lam., *M. gibbosa* Sow., *Pseudomonotis echinata* var. *doneziana* Bor., *Pecten demissus* Goldf., *P. spathulatus* Roem., *P. vitreus* Roem., *P. lens* Sow., *P. nalivkini* Bor., *P. pumilus* Lam., *Oxytoma* ex gr. *inacquivallis* Sow., *Liryodon triangulara* Goldf.

Черевоні молюски. В глинах підлужної світи подекуди зустрічаються поодинокі представники *Amberleya*, *Pleurotomaria*, *Ceritium*. Окрім того, в 1958 році І.М. Ямниченко в юрських відкладах Дніпровсько-Донецької западини та окраїн Донбасу була описана своєрідна фауна дрібних черевоніх молюсків [29]. В інтервалі поширення аммоніту *Garantiana garanti* описані наступні види черевоніх молюсків: *Zygopleura gradata* Jamn., *Z. devexa* Jamn., *Z. innumera* Jamn., *Z. innumera* var. *improcera* Jamn., *Z. innumera* var. *aticulosa* Jamn., *Z. clivosa* Jamn., *Katosira compacta* Jamn., *Anoptychia limpida* Jamn., *A. contempta* Jamn., *A. calva* Jamn., *A. exposita* Jamn.

Головоні молюски зустрічаються досить часто по всій світі, зазвичай у вигляді відбитків середнього ступеню збереженості. У 1908 році О.О. Борисяк [5] описав фауну головоніх молюсків, в тому числі, наступні види амонітів: *Garantiana garanti* d'Orb., *G. minima* Wetz., *G. bifurcata* Ziet., *G. baculata* Ziet., *Oppelia* sp., *Pseudocosmoceras michalskii* Bor., *P. cf. masarovici* Mourach., *Parkinsonia parkinsoni* Sow., *P. doneziana* Bor., *P. subarictis* var. *acris* Wetz., *P. cf. neuffensis* Oppel.

Значно рідше зустрічаються ростри белемнітів: *Belemnites giganteus* Schlith., *B. sulcatus* Mill., *B. breviformis* Volz., *B. subclavatus* Voltz., *B. ellipticus* Mill., *B. aalensis* Voltz., *B. quinquesulcatus*

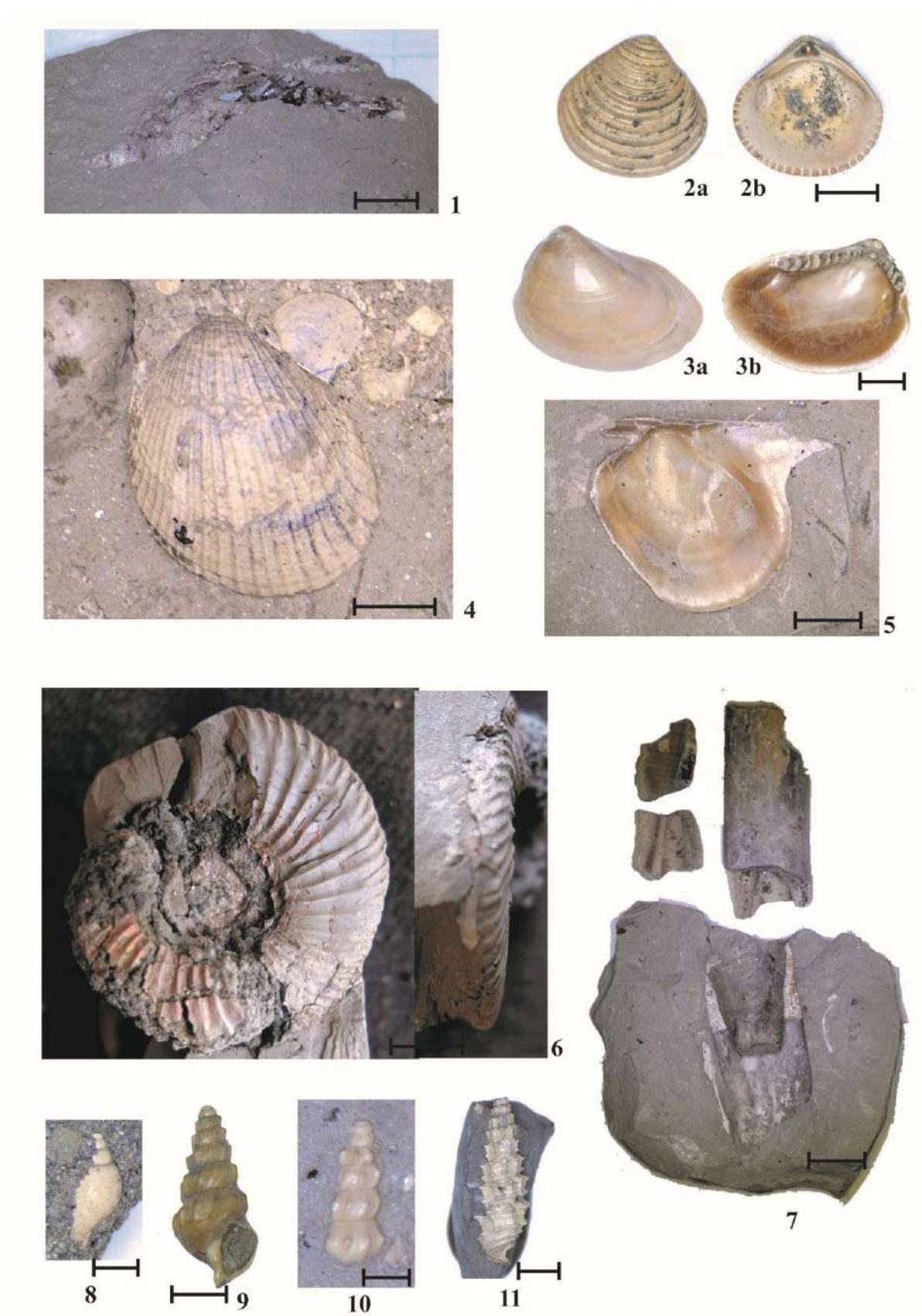


Рис. 6. Макрофосилії з відкладів підлузьної світи північно-західної окраїни Донбасу.
 1. *Francocaris* cf. *grimmii* Broili; 2 a, b. *Astarte* sp.; 3 a, b. *Nucula sana* Bor.; 4. *Pseudomonotis echinata* var. *doneziana* Bor.; 5. *Oxytoma* ex gr. *inaequalis* Sow.; 6. *Parkinsonia doneziana* Bor.; 7. *Belemnites quinquesulcatus* Blainv.; 8. *Anoptychia calva* Jamn.; 9. *Zygopleura innumera* Jamn.; 10. *Zygopleura gradata* Jamn.; 11. *Zygopleura* sp. Мірало 1-7 – 1 см, 8-11 – 1 мм /

Fig. 6 Macrofossils from the sediments of the Pidluzhna formation of the northwestern outskirts of Donbas

Blainv.

Брахіоподи зустрічаються лише в байоській частині світи. В.П. Макрідінім описані [15]: *Lin-gula beanie* Phill., *Ptyctothyris remisovi* Makridin, *Acanthothyris* ex gr. *spinosa* (Schloth.), *Flabellirhynchia lotharingica* (Haas et Petri).

Стратиграфія. Підлужна світа утворилась впродовж пізнього байосу – раннього бату в умовах нормального морського басейну. За літологічними ознаками вона однорідна і на менші літо-стратиграфічні одиниці бути поділена не може (рис. 7). Складена вона глинами темно-сірими, іноді з блакитним відтінком. В товщі глин зустрі-

чаються конкреції карбонатів (кальцитові та сидеритові) еліптичної форми розміром від п'яти – десяти сантиметрів до 1,2 м по більшому діаметру. В нижній частині світи кількість конкрецій та їх розмір більше, часто вони утворюють прошарки.

Палеонтологічні рештки, в тому числі керівні види амонітів, зустрічаються у підлужній світі досить часто, що вперше для юрських відкладів району с. Кам'янка дає змогу виділити впевнено зони, в тому числі за амонітами. В нижній частині світи виділяється зона *Garantiana garanti* та *Parkinsonia parkinsoni*, в верхній частині – лона *Pseudocoscrocera michalskii*.

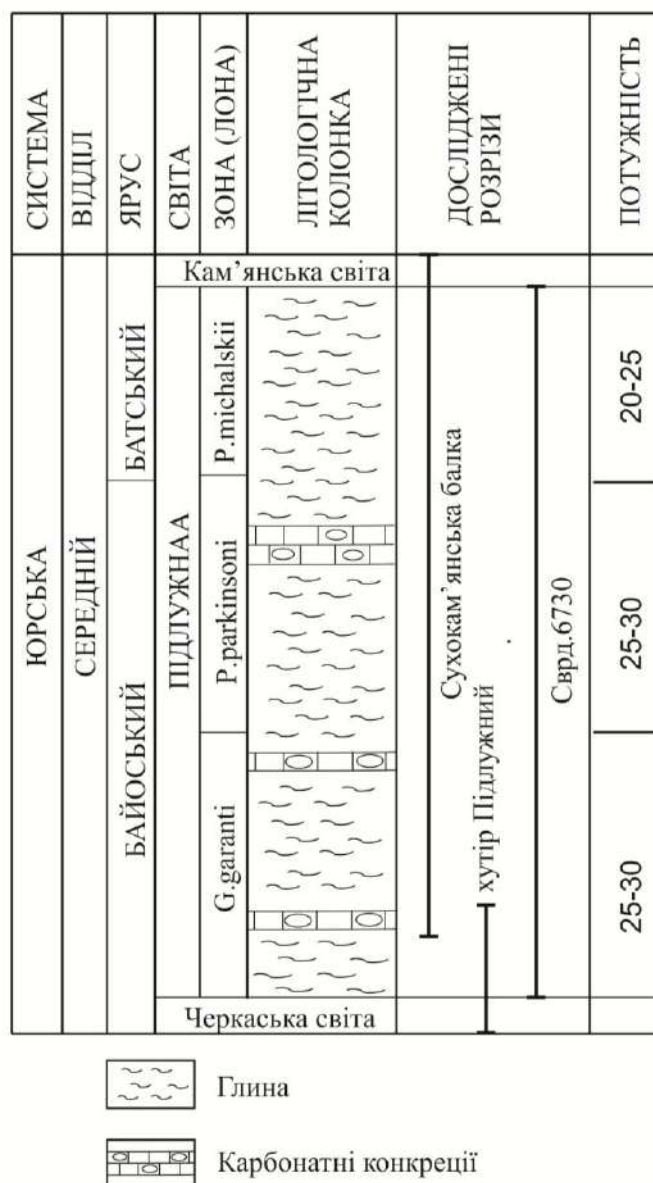


Рис. 7. Стратиграфія підлужної світи / Fig. 7. Stratigraphy of the Pidluzhna formation

Загальна потужність підлужної світи в межах кам'яняського полігону складає 70-80 м.

Умови накопичення. Підлужна світа сформувалась в умовах максимуму середньо-пізньо-юрської (байос – кимеридж) трансгресії. Початок трансгресії припадав на пізньочеркаський час

[17]: в цей час збільшується глибина басейну, солоність стає нормальною, з'являється нормальна морська фауна.

Протягом підлужного часу морські умови були достатньо стабільними, що привело до накопичення практично однорідної товщі глин. Глиби-

на басейну відповідала нижній літоралі, в придонній частині спостерігались застоїні явища, що приводило до утворення карбонатів заліза. Антиклінальні підняття продовжують ріст, що приводить до незначного записочування відкладів на їх схилах.

Усереднена швидкість осадконакопичення протягом пізнього байосу – раннього бату досить висока та складає 3,6-4,2 см/тис. років.

Висновки. На підлужний час приходить максимум середньоюрської трансгресії. Встановлюється стабільний нормальноморський режим. Отримає розвиток різноманітна морська біота. У дослідників стратиграфії юрських відкладів Донбасу нема суперечок, щодо визначення віку та об'єму цієї світи.

За даними палінологічного аналізу підтверджуються висновки щодо віку відкладів підлужної світи району Кам'янки. Відклади середнього відділу юрської системи вирізняються за появою пилоквих зерен голонасінних *Eucommiidites troedsoni* та *Cerebropollenites mesozoicus*. Представників цих видів ми відмічаємо вже у значній кіль-

кості у байоських відкладах району Кам'янки. Також характерною ознакою, саме байосу, є домінування папоротеподібних *Dictyophyllidites* та поява *Neoraistrickia rotundiformis*, *Duplexisporites anagrammensis*, *Converrucosisporites disparituberculatus*, *Laevigatosporites ovatus*, *Leptolepidites major*, *Densoisporites velatus* та пилку голонасінних *Callialasporites dampieri*, *Araucariacites australis*, *Vitreisporites pallidus*. Поява більшої кількості родів плаунів, вужачкових та ін. *Foveosporites*, *Klukisporites*, *Lycopodiacidites* та *Uvaesporites*, а також папоротеподібних *Clathropteris obovata* var. *magna* та домінування *Concavisporites* вирізняє батські відклади, що ми і спостерігаємо у кам'яньських розрізах.

Подяка. У цій публікації висвітлено результати палінологічних досліджень виконаних у рамках бюджетної теми «Біостратиграфія мезо-кайнозойських відкладів нафтогазоносних регіонів України як фундаментальна основа системного забезпечення геологічних робіт», що розробляється в Інституті геологічних наук НАН України (номер державної реєстрації 0122U001604) та частково профінансована.

Список використаних джерел

1. Бланк М.И. (1961). Описание новых видов фораминифер из среднеюрских отложений северо-западной окраины Донецкого кряжа и восточной части Днепровско-Донецкой впадины. Тр. ВНИГНИ, XXIX, 207-221.
2. Борисяк А. (1904). *Pelecypoda* юрских отложений европейской России. Вып. 1: *Nuculidae*. Тр. Геолком. Новая сер., 11, 49.
3. Борисяк А. (1905). *Pelecypoda* юрских отложений европейской России. Вып. 2: *Arcidae*. Тр. Геолком. Новая сер., 19, 63.
4. Борисяк А. (1906). *Pelecypoda* юрских отложений европейской России. Вып. 3: *Mytilidae*. Тр. Геолком. Новая сер., 29, 35.
5. Борисяк А.А. (1908). Фауна Донецкой юры. Вып. 1. *Cephalopoda*. Тр. Геол.ком., Нов.сер., 37, 92.
6. Гожик П.Ф., Семененко В.М., Маслун Н.В., Полетаев В.І., Іванік М.М., Міхницька Т.М., Великанов В.Я., Мельничук В.Г., Константинович Л.І., Кір'янов В.В., Цегельнюк П.Д., Котляр О.Ю., Берченко О.І., Вдовенко М.В., Шульга В.Ф., Немировська Т.І., Щеголев О.К., Бояріна Н.І., П'яtkова Д.М., Плотнікова Л.Ф., Лещух Р.Й., Жабіна Н.М., Шевчук О.А., Якушин Л.М., Анікеєва О.В., Веклич О.Д., Приходько М.Г., Тузяк Я.М., Матлай Л.М., Доротяк Ю.Б., Шайнога І.В., Клименко Ю.В., Гоцанюк Г.І. (2013). Стратиграфія верхнього протерозою та фанерозою України. Стратиграфія верхнього протерозою, палеозою та мезозою України. ІГН НАН України. Логос. Київ, 1, 637. ISBN: 978-966-171-789-2
7. Канский Н.Е., Макридин В.П., Стерлин Б.П. (1958). Фауны и палеогеография юрских отложений северо-западных окраин Донецкого складчатого сооружения. Зап. геол. ф-та Харьковского ун-та. 13, 123-150.
8. Каптаренко-Черноусова О.К. (1959). Фораминиферы юрских отложений Днепровско-Донецкой западины. Тр. ІГН АН УРСР, сер. Стратиграфії і палеонтології. 15.
9. Каптаренко-Черноусова О.К. (1960). Юрські лягеніди північно-східної частини Української РСР. Тр. ІГН АН УРСР, сер. стратиграфія і палеонтологія. 22, 103.
10. Каптаренко-Черноусова О.К. (1961). Лентікуліни юрських відкладів Дніпровсько-Донецької западини та окраїн Донбасу. Тр. ІГН АН УРСР, сер. стратиграфія і палеонтологія. 36, 104.
11. Карпова Г.В., Космачов В.Г. (1963). К литологии среднеюрских отложений северо-западной окраины Донецкого бассейна. Зап.геол. отд. Харьковского ун-та. 15, 19-27.
12. Лунгерсаузен Л.Ф. (1941). Новые данные по стратиграфии юры. В кн. Геологическое строение СССР. Донбасс. Геологическое описание, 234-243.
13. Лунгерсаузен Л.Ф. (1942). Байосские и батские отложения Донецкого кряжа. ДАН СССР, нов. сер, XXXIV, 6, 186-189.
14. Любимова П.С. (1956). Триасовые и юрские остракоды восточных районов Украины. Тр. ВНИГРИ. Нов.серия, 98, 8, 533-583.
15. Макридин В.П. (1964). Брахиоподы юрских отложений Русской платформы и некоторых прилегающих к ней областей, 396.
16. Матвеев А., Паккі М., Шевчук О., Клевцов О. (2023). Стратиграфія юрської системи району села Кам'янка. Частина 1. Кожулинська світа. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 58, 59-72. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-05>

17. Матвеев А., Шевчук О., Колосова І., Локтев А. (2024). Стратиграфія юрської системи району села Кам'янка. Частина 2. Черкаська світа. Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», (60), 56-67. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-04>
18. Пермякова М.М. (1968). Зональний розподіл байоських остракод Дніпровсько-Донецької западини та окраїн Донбасу. Доп.АН УРСР, Б. 8, 689-692.
19. Семенова Е.В. (1970). Споры и пыльца юрских отложений и пограничных слоев триаса Донбаса. Наук. думка. Киев, 143.
20. Стратиграфія УРСР. Т. VIII Юра. (1969). Київ, Наук. думка, 219.
21. Шевчук О.А. (2007). Нові палеонологічні дані до характеристики середньоярських відкладів південного борту Дніпровсько-Донецької западини. Палеонтологічний збірник. Львів, 39, 56-65.
22. Шевчук О.А. (2013). Дисперсні кутикули з юрських відкладів Українського щита та Дніпровсько-Донецької западини. Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України, 6, 2, 31-36.
23. Шевчук О.А. (2015). Трахеїди з юрських відкладів України. Доповіді Національної Академії наук України. Київ, 7, 105-109. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2015.07.105>
24. Шевчук О.А. (2016). Біостратиграфія середньої юри центральної та східної частини платформної України. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», Харків, (45), 86-99. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2016-45-12>
25. Шевчук О.А. (2018). Spore-pollen biostratigraphy Jurassic and Cretaceous of Ukraine. Палеонтологічний збірник. Львів, 50, 60-72.
26. Шевчук О.А. (2020). Стратиграфія середньої юри – крейди України за мікрофосиліями. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора геологічних наук. Спеціальність 04.00.01. – загальна та регіональна геологія. Галузь знань: 103 – Науки про Землю. Інститут геологічних наук Національна Академія Наук України. Київ, 44.
27. Шевчук О.А., Іванченко К.В. (2021). Акритархи мезозою України. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», (55), 107-116. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-55-08>
28. Шрамкова Г.В. (1963). Спорово-пыльцевые комплексы мезозойских отложений северо-западного Донбасса и Днепровско-Донецкой впадины. Тр. В-го ун-та. Геол. сб. В-ж, 62, 93-98.
29. Ямниченко І.М. (1958). Лохопетатиде юрських відкладів Дніпровсько-Донецької западини та окраїн Донбасу. Тр. ІГН НАН України, сер. Стратиграфії і палеонтології, 23, 43.
30. Shevchuk O.A., Boyarina N., Sukhov O., Shevchuk O.I., Vajda V., Mcloughlin S. (2024). The palaeobotanical heritage of Ukraine and its endangered status following to the Russian military invasion. Review of Palaeobotany and Palynology. 331. 105201. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2024.105201>
31. Shevchuk O.A., Vajda V. (2016). Stratigraphy and paleoecology of Middle Jurassic dinocyst assemblages from the Dnieper-Donets Basin of central Ukraine. Paper 5193, Symposium, T44.P1. Palaeontology and Palaeo-anthropology, 35th International Geological Congress, Cape Town, South Africa. 1, 55-57.
32. Shevchuk O.A., Slater S.M., Vajda V. (2018). Palynology of Jurassic (Bathonian) sediments of Donbas, northeast Ukraine. Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments. 98 (1), 153–164. <https://doi.org/10.1007/s12549-017-0310-3>
33. Sirenko O.A., Shevchuk O.A. (2021). Levels of changes in the genus Pinus Linné in the composition of Mesozoic and Cenozoic flora and vegetation as an additional criterion for the division of sediments by the Mesozoic and Cenozoic of Ukraine. Journal of Geology, Geography and Geoecology. Dnipro, 30(4). 741-753. <https://doi.org/10.15421/112168>

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу.

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

Jurassic system stratigraphy at the Kamianka village. Part 3. The Pidluzhna formation

Andriy Matveev¹

DSc (Geology), Associate Professor,

Department of Fundamental and Applied Geology,

¹ V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine;

Olena Shevchuk^{2,3}

DSc (Geology), Leading Researcher,

² Center for Paleogenetics, Stockholm University;

³ Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ABSTRACT

Introduction. The paper is devoted to the study of the Pidluzhna Formation of the Jurassic system of the North-Western outskirts of the Donetsk folded structure and is a continuation of a series of publications highlighting the stratigraphy of Jurassic deposits in key areas near the town of Izyum and the village of Kamianka.

Analysis of previous publications. The Pidluzhna Formation was first identified by L.F. Lungershausen in 1941, he noted the homogeneity of the lithological composition and the somewhat different nature of the sediments in the zones of relative uplift and subsidence. Later, these deposits were not considered in the rank of Formation, but were attributed to the Upper Bajocian - Lower Bathonian.

Material and methods. The Pidluzhna Formation is widespread in the Kamianskaya area. Since the deposits are composed mainly of clays, there are no more or less significant outcrops of it.

The scientific search was based on the analysis of literature, results of previous drilling and mapping works, as well as own field, laboratory and analytical studies. Micropaleontological analysis and generalized data on the distribution of fossil remains were carried out. The palynological analysis of these deposits was also carried out, namely, stratified deposits with the help of microphytofossils.

Results and discussion. Since the stratotype of the Pidluzhna Formation has not been precisely specified and currently the stratotype area is under urban development and only its small fragments are exposed, it is possible to propose as a neostratotype the outcrop of this Formation near the village of Sukha Kamyanka, in a ravine that extends north parallel to the Sukha Kamyanka - Yaremivka road.

Lithology. The lithological composition of the Pidluzhna Formation was studied in detail by G.V. Karpova and V.G. Kosmachev. The main, clayey, part of the formation is composed of hydromicas with a slight admixture of montmorillonite group minerals and kaolin.

Paleontological remains and Stratigraphy. This work summarizes previous paleontological data of scientists and supplements them with their own research. In general, these are brachiopods, cephalopods, gastropods, bivalves, malacostraca, ostracods, foraminifera, wood cuticles and tracheids, remains of prasinophyte and dinophyte algae, acritarchs, and spores and pollen of higher plants.

Paleontological remains, including leading ammonite species, are found in the Pidluzhna Formation quite often. In the lower part of the Formation (Bajocian) - the *Garantiana garanti* and *Parkinsonia parkinsoni* zones stand out, in the upper part (Bathonian) - lones of the *Pseudocosmoceras michalskii*.

According to the data of palynological analysis, the conclusions regarding the age of the sediments of the Pidluzhna Formation are confirmed. A characteristic feature, namely the Bajocian, is the dominance of fern-like *Dictyophyllidites* and the appearance of spores of *Neoraistrickia rotundiformis*, *Duplexisporites anagrammensis*, *Converrucosporites disparituberculatus*, *Laevigatosporites ovatus*, *Leptolepidites major*, *Densoisporites velatus* and pollen of gymnosperms *Callialasporites dampieri*, *Araucariacites australis*, *Vitreisporites pallidus*. *Foveosporites*, *Klukisporites*, *Lycopodiacidites* and *Uvaesporites*, as well as fern-like *Clathropteris obovata* var. *magna* and the dominance of *Concavisporites distinguishes* the Bathonian deposits, which we observe in the Kamianka sections.

Keywords: Jurassic system, Pidluzhna formation, North-Western Donbas, stratigraphy, lithology, paleontological remains.

References

- Blank M. I. (1961). Description of new species of foraminifera from the Middle Jurassic sediments of the northwestern margin of the Donetsk Ridge and the eastern part of the Dnieper-Donets Basin. *Proc. VNIGOI*, XXIX, 207-221.
- Borysiak A. (1904). *Pelecypoda of Jurassic deposition of European Russia. Issue 1: Nuculidae. Works of Geolkom. New series*, 11, 49.
- Borysiak A. (1905). *Pelecypoda of Jurassic deposition of European Russia. Issue 2: Arcidae. Works of Geolkom. New series*, 19, 63.
- Borysiak A. (1906). *Pelecypoda of Jurassic deposition of European Russia. Issue 3: Mytilidae. Works of Geolkom. New series*, 29, 35.
- Borysiak A.A. (1908). *Fauna of the Donetsk of Jurassic. Cephalopoda. Works of Geolkom. New series, Issue. 1*. 37.
- Stratigraphy of the Upper Proterozoic and Phanerozoic of Ukraine. Volume 1: Stratigraphy of the Upper Proterozoic, Paleozoic and Mesozoic of Ukraine. Chief editor P.F. Gozhik* (2013). K, IGS NAS of Ukraine, Logos, 638. ISBN: 978-966-171-789-2 [in Ukrainian]
- Kansky N.E., Makridin V.P., Sterlin B.P. (1958). *Facies and paleogeography of the Jurassic sediments of the north-western outskirts of the Donetsk fold structure. Notes of the Faculty of Geology of Kharkiv University*, 13. 123-150.
- Kaptarenko-Chernousova O.K. (1959). *Foraminifera of the Jurassic sediments of the Dnipro-Donetsk Basin. Works of the Geology Institute of Scientific Research of the Ukrainian SSR, series "Stratigraphy and Paleontology"*, 15. [in Ukrainian]
- Kaptarenko-Chernousova O.K. (1960). *Jurassic hyagenids of the northeastern part of the Ukrainian SSR. Proceedings of the Institute of Natural Sciences of the Ukrainian SSR, series Stratigraphy and Paleontology*. 22, 103. [in Ukrainian]
- Kaptarenko-Chernousova O.K. *Lenticulins of Jurassic sediments of the Dnipro-Donetsk depression and the outskirts of Donbas. Proceedings of the Institute of Natural Sciences of the Ukrainian SSR, series Stratigraphy and Paleontology*. 36, 104. [in Ukrainian]
- Karpova G.V., Kosmachov V.G. (1963). *On the lithology of the Middle Jurassic deposits of the northwestern margin of the Donetsk basin. Western Geological Department of Kharkov University*. 15, 19-27
- Lungershausen L.F. (1941). *New data on Jurassic stratigraphy. In the book: Geological structure of the USSR. Donbass. Geological description*, 234-243.18.

13. Lungershausen L.F. (1942). Bajocian and Bathonian deposits of the Donetsk Ridge. RAS USSR, New series, XXXIV, 6, 186-189.
14. Lubimova P.S. (1956). Triassic and Jurassic ostracods of eastern regions of Ukraine. Proc.VSDGII, New series, 98, 8, 533-583.
15. Makridin V.P. (1964). Brachiopods of the Jurassic deposits of the Russian platform and some adjacent areas. M. Nedra, 396.
16. Matveyev A., Pakky M., Shevchuk O. et (2023). Jurassic system stratigraphy at the Kamianka village. Part 1. The Kozhulinska formation. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (58), 59-72. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-05> [in Ukrainian]
17. Matveyev A., Shevchuk O., Kolosova I. et (2004). Jurassic system stratigraphy at the Kamianka village. Part 2. The Cherkaska formation. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (60), 56-67 <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-04> [in Ukrainian]
18. Permyakova M.M. (1968). Zonal distribution of Bajocian ostracods of the Dnieper-Donetsk basin and the outskirts of Donbas. Reports of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, series B. 8, 689-692.
19. Semenova E.V. (1970). Spores and pollen of Jurassic sediments and boundary layers of the Triassic of Donbass. Kyiv, Nauk. dumka, 143.
20. Stratigraphy of the Ukrainian SSR. T. VIII Jurassic (1969). Kyiv, Nauk. dumka, 219. [in Ukrainian]
21. Shevchuk O.A. (2007). New palynological data for the characterization of Middle Jurassic sediments of the southern side of the Dnipro-Donetsk depression. Paleontol. zb. 39, 56-65. [in Ukrainian]
22. Shevchuk O.A. (2013). Dispersed cuticles from Jurassic deposits of the Ukrainian Shield and the Dnipro-Donetsk Depression. Collection of scientific papers of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine, 6(2), Electronic resource. 31-36. [in Ukrainian]
23. Shevchuk O.A. 2015. (2015). Tracheids from the Jurassic deposits of Ukraine. Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine. Kyiv, (7), 105-109. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2015.07.105> [in Ukrainian]
24. Shevchuk O.A. (2016). Biostratigraphy of the Middle Jurassic of the central and eastern part of platform Ukraine. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (45), 86-99. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2016-45-12> [in Ukrainian]
25. Shevchuk O.A. (2018). Spore-pollen biostratigraphy Jurassic and Cretaceous of Ukraine. Paleontol. zb. 50, 60-72. [in Ukrainian]
26. Shevchuk O.A. (2020). Dissertation abstract for obtaining the scientific degree of Doctor of Geological Sciences "Stratigraphy from Middle Jurassic to Cretaceous of Ukraine according to microfossils". Specialty 04.00.01. – general and regional geology. Field of knowledge: 103 - Earth Sciences. Institute of Geological Sciences, National Academy of Sciences of Ukraine. Kyiv. 44. [in Ukrainian]
27. Shevchuk O.A., Ivanchenko K.V. (2021). Mesozoic acritarchs of Ukraine. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (55), 107-116. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-55-08> [in Ukrainian]
28. Schramkova G.V. (1963). Spore-pollen complexes of Mesozoic sediments of northwestern Donbass and the Dnieper-Donets Basin. Proc. Voronezh uni. Geology. 62, 93-98.
29. Jamnischenko I.M. (1958). Loxonematidae of Jurassic sediments of the Dnipro-Donetsk depression and the outskirts of Donbass. Proc. IGS NAS of Ukraine, Tectonic and Stratigraphy. 23, 43. [in Ukrainian]
30. Shevchuk O.A., Boyarina N., Sukhov O., Shevchuk O.I., Vajda V., McLoughlin S. (2024). The palaeobotanical heritage of Ukraine and its endangered status following to the Russian military invasion. Review of Palaeobotany and Palynology. 331. 105201. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2024.105201>
31. Shevchuk O.A., Vajda V. (2016). Stratigraphy and paleoecology of Middle Jurassic dinocyst assemblages from the Dnieper-Donets Basin of central Ukraine. Paper 5193, Symposium, T44.P1. Palaeontology and Palaeo-anthropology, 35th International Geological Congress, Cape Town, South Africa. 1, 55-57.
32. Shevchuk O.A., Slater S.M., Vajda V. (2018). Palynology of Jurassic (Bathonian) sediments of Donbas, northeast Ukraine. Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments. 98 (1), 153–164. <https://doi.org/10.1007/s12549-017-0310-3>
33. Sirenko O.A., Shevchuk O.A. (2021). Levels of changes in the genus Pinus Linné in the composition of Mesozoic and Cenozoic flora and vegetation as an additional criterion for the division of sediments by the Mesozoic and Cenozoic of Ukraine. Journal of Geology, Geography and Geoecology. Dnipro, 30(4). 741-753. <https://doi.org/10.15421/112168>

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 18 March 2025

Accepted 15 May 2025

Альтернативний погляд на умови формування донеогенового ложа Крукеницької западини

Ігор Михайловський¹

¹ ТзОВ «БУРПРОЕКТ», Львів, Україна,

e-mail: igormykhailovskiy@ukr.net,  <https://orcid.org/0009-0007-7948-4026>;

Михайло Андрейчук²

к. геол. н., геолог² ПП «ГЕОБУРПРОЕКТ», Львів, Україна,

e-mail: geoburproekt@ukr.net

На основі комплексних геолого-геофізичних досліджень Крукеницька западина представлена як складова частина донеогенової ерозійної системи Зовнішньої зони Передкарпатського прогину. Основним чинником формування розривних та плекативних порушень вважаються сили гравітації, що є підставою для нових поглядів на утворення вуглеводневих пасток в розрізі верхніх молас. Мета дослідження виявити вплив донеогенових ерозійних процесів на формування палеогеоморфологічних особливостей донеогенового ложа північно-східної прибортової частини Крукеницької западини. Крукеницька западина відрізняється від суміжної Косівсько-Угерської підзони Зовнішньої зони Передкарпатського прогину, насамперед, глибинами залягання донеогенової основи, що стало основним чинником скачкоподібного зростання товщини міоценового комплексу, представленого, в основному, теригенними утвореннями баден-сарматського віку, які в межах западини з кутовим і стратиграфічним неузгодженням перекривають сильно дислоковані та метаморфізовані утворення рифею. Мезозойський та палеозойський комплекси в донеогеновій основі української частини Крукеницької западини відсутні і pojawiaються, поступово омолоджуючи останню тільки на крутому північно-східному схилі та в межах її зародження на території Польщі. Згідно існуючої моделі Крукеницька западина представляється як погруджений по Краковецькому розлому мегаблок автохтонної частини Передкарпатського прогину, в межах якого міоценовий верхньомоласовий комплекс зі стратиграфічним і кутовим неузгодженням перекриває метаморфізовані і дислоковані породи рифею. В донеогеновій основі Зовнішньої зони Передкарпатського прогину північно-східна окраїна Крукеницької западини вперше представлена як крутий повздовжній схил глибокої ерозійної палеодолини, ускладнений багаточисельними елементами гравігенного сповзаннями мезо-палеозойської товщі. Домінуюча роль при формуванні блокової будови досліджуваної ділянки вперше відводиться силам гравітації в сукупності з палеогеоморфологічними особливостями донеогенового ложа. Отримані дані дозволяють по новому оцінити умови формування вуглеводневих пасток, як у теригенному комплексі міоцену, так і в породах донеогенової основи північно-східної прибортової частини Крукеницької западини з метою більш ціленаправленого проведення геолого-розвідувальних робіт на цій ділянці Зовнішньої зони прогину.

Ключові слова: прогин, западина, прибортова частина, тектонічні порушення, денудація, поверхня розмиву.

Як цитувати: Михайловський Ігор, Андрейчук Михайло (2025). Альтернативний погляд на умови формування донеогенового ложа Крукеницької западини. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (62), 85-94. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-06>

Incites: Mykhailovskiy Ihor, Andreychuk Mykhailo (2025). An alternative view of the conditions of the formation of the pre-Neogene bed of the Krukenytska basin. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (62), 85-94. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-06> [in Ukrainian]

Вступ. На сьогоднішній день більша частина верхньомоласового комплексу неогену, як і мезозойської основи Більче-Волицької зони Передкарпатського прогину опитуковані на предмет вуглеводнів. Резерв неопитукованих локальних структур, що достовірно фіксуються сейсмічними дослідженнями, швидко скорочується. На порядок денний виходить потреба в реалізації нових напрямків прогнозування нафтогазопошукових об'єктів, які можуть забезпечити нарощення ресурсної бази в Передкарпатському регіоні. Успішність пошуків перспективних об'єктів потребує нових методичних підходів, ревізії існуючих уявлень про умови формування елементів регіональної моделі Зовнішньої зони Передкарпатського прогину. Одним з таких елементів є верхньомоласова товща на стику, виділених на сьогоднішній день, регіональних тектонічних мегаблоків: Косівсько-Угерської підзони і Крукеницької запа-

дини. Тут вона відрізняється стрімким зростанням товщин продуктивних горизонтів, значними кутами падіння, складом порід, значною мінливістю фільтраційно-ємнісних параметрів порід-колекторів, а також блоковою будовою, зумовленою різноамплітудними плекативними та розривними порушеннями, в основному, безкореневими скидодового та скидо-зсувного типів.

Вище згадані фактори на пряму залежать від умов баден-сарматського осадконагромадження, зокрема від палеогеоморфологічних особливостей дна басейну седиментації. У статті, як основний чинник формування верхньомоласового ложа, розглядається ерозійна діяльність донеогенової системи палеорусел та її активізація на початку міоцену.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Регіональна перерва осадонагромадження, що існувала в Зовнішній зоні Передкарпатського

прогину впродовж палеогену - карпатію зумовила активізацію ерозійних процесів на значній території сучасного Передкарпаття. Особливо вони проявились на початку міоценового часу, в наслідок чого сформувалась система палеорусел, та глибоких палеоврізів.. Вперше її описав у 1958 році В.Утробін. Надалі ерозійну природу донеогенової основи Передкарпаття прийнято за основу для побудови Геологічної карти західного регіону України масштабу 1: 100 000 (Муравінський та ін., 1966 р.). По мірі нарощення Наприкінці XX - на початку XXI ст. значну увагу вивченню захованого донеогенового палеорельєфу Передкарпатського прогину приділяли вітчизняні та зарубіжні геологи (І. Вишняков, Т. Ізотова, В. Ващенко, Ю. Крупський, П. Чепіль, В. Котик, П. Бодлак, В. Гневуш, Д. Петровський, М. Андрейчук, О. Павлюх П. Карнковський, Т. Ленк, Е. Явор, М. Ксьонжкевич, Я. Самсонович та ін.

У 2010 році творчим колективом УкрНДГРІ під керівництвом І.Вишнякова було складено регіональну структурну карту підосви верхньобаденських відкладів Більче-Волицької зони Передкарпатського прогину з локалізацією ділянок, перспективних для розвитку пасток природного газу з використанням матеріалів ЗУГРЕ, ДП «Західургеологія» і ДП «Укргазвидобування».

По мірі нарощення об'ємів пошуково-розвідувального буріння, а в останній час – проведення детальних сейсморозвідувальних робіт за методикою 3D, регіональна модель донеогенової поверхні Зовнішньої зони Передкарпатського прогину постійно удосконалюється. Оновлені і уточнені моделі наведені в працях М. Андрейчука [2], Х. Заяць [7], Я. Лазарука [13], Ю. Крупського [9,11] та інших дослідників.

Вище вказаними науковцями висвітлено та обґрунтовано нові методичні підходи до вивчення тектонічних, літолого-стратиграфічних особливостей будови неогенового комплексу Більче-Волицької зони Передкарпатського прогину, включаючи Крукеницьку западину, що базуються на дослідженні зв'язків баден-сарматського осадконагромадження з палеоструктурними особливостями донеогенового ложа, встановлено перспективні ділянки поширення порід-колекторів та сприятливих структурних умов для формування покладів вуглеводнів.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. На даний час невирішеною проблемою є природа зчленування верхніх молас глибоко зануреної Крукеницької западини з припіднятим мегаблоком Більче-Волицької зони Передкарпатського прогину (Косівсько-Угерською підзоною). В науковій літературі межа між ними, не зважаючи на приняті трактування ерозійної природи донеогенової основи Зовнішньої зони,

надалі проводиться по регіональному Краковецькому скиду. Зроблені окремі спроби моделювання активного прогинання прирозломної смуги припіднятого мегаблоку до площини диз'юнктивного порушення, проте вони не дають пояснення на всі питання співвідношення між вище згаданими тектонічними одиницями, основне з яких – значна різниця у віку порід донеогенової основи.

Виклад основного матеріалу. Крукеницька западина відрізняється від суміжної Косівсько-Угерської підзони Зовнішньої зони Передкарпатського прогину, насамперед, глибинами залягання донеогенової основи, що стало основним чинником скачкоподібного зростання товщини міоценового комплексу, представленого, в основному, теригенними утвореннями баден-сарматського віку, які з кутовим і стратиграфічним неузгодженням перекривають сильно дислоковані та метаморфізовані утворення рифею [4,17]. Мезозойський та палеозойський комплекси в донеогеновій основі української частини Крукеницької западини відсутні і появляються, поступово омолоджуючи останню тільки на крутому північно-східному схилі та в межах її зародження на території Польщі [12].

За результатами сейсморозвідувальних робіт та глибокого буріння Крукеницька западина має клиноподібну форму, вісь якої орієнтована під кутом біля 30° до Карпатської насувної споруди. Автохтонні відклади сарматського ярусу виходять під утворення антропогену тільки в її північно-східній частині, в південно-західному напрямку вони поступово зрізаються покровом теригенно-хемогенних утворень Самбірської зони, а потім по порівняно вузькій смузі (4–6 км) осадові породи Зовнішньої зони по серії скидів, яка збігається з регіональним мінімумом сили тяжіння (Передкарпатський розлом) східцеподібно занурюються в південно-західному напрямку під елементи пізньоальпійського орогенезу. За сейсмічними даними амплітуда розлому досягає 3 км. (рис. 1).

Найбільш загадковою є північно-східна приборова частина западини, крутизна схилу якої вниз по розрізу стрімко зростає, наближаючись до вертикального положення. Вона в основних рисах орієнтована по Краковецькому глибинному розлому, період розвитку якого припадає на донеогеновий час. Амплітуди вертикальних зміщень поверхні розмиву Крукеницької западини відносно припіднятої Косівсько-Угерської підзони зростають вздовж розлому в південно-східному напрямку – від невеликих значень на території Польщі, де в північно-західному напрямку на відстані 12,5 км від державного кордону з Україною вони повністю затухають, до 4,5-5 км в зоні перетину з Передкарпатським розломом.

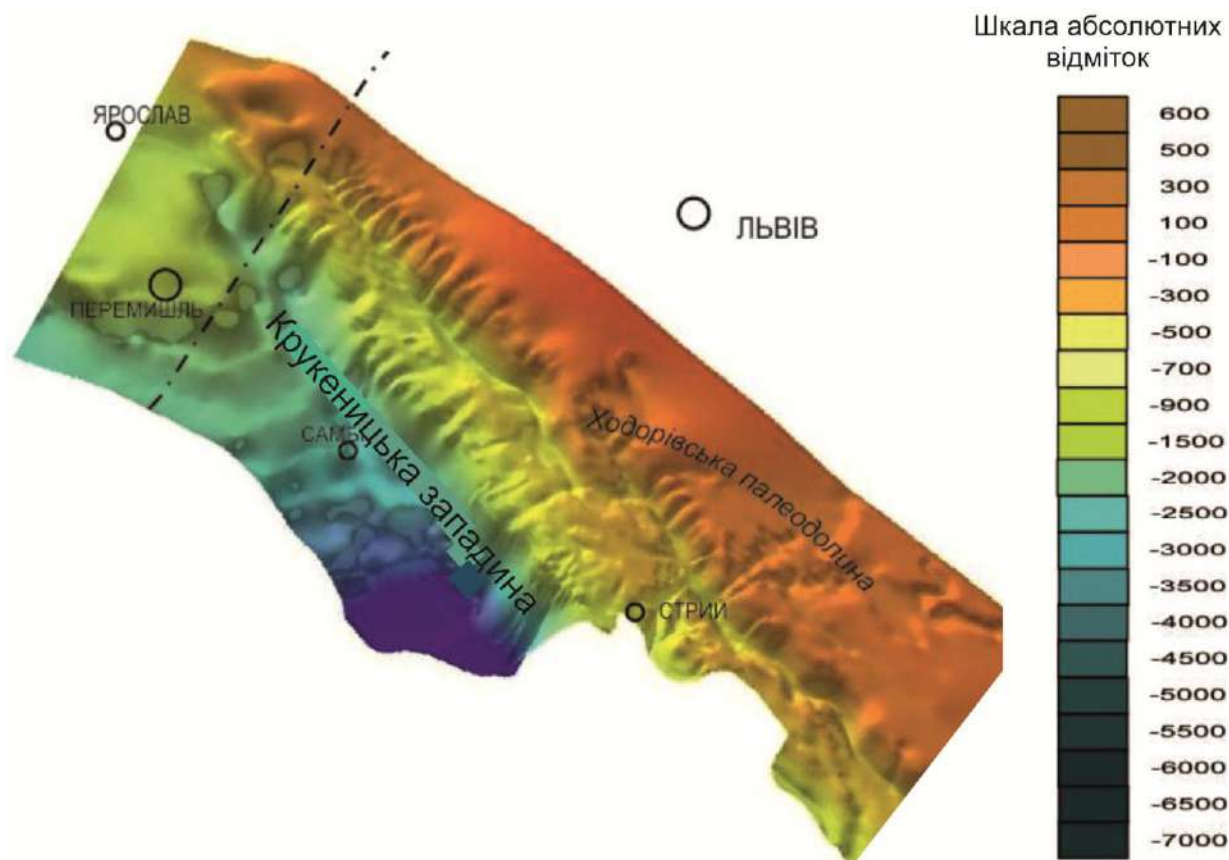


Рис. 1. Схематична структурна карта донеогенової поверхні північно-західної частини Зовнішньої зони Передкарпатського прогину [2] / Fig. 1. Schematic structural map of the pre-Neogene surface of the north-western part of the Outer Zone of the Precarpathian Trough [2]

Процес формування Крукеницької западини, як гіпсометрично опущеного елементу Зовнішньої зони Передкарпатського прогину до кінця не вивчений. Одним з чинників могли бути ерозійні процеси, що відбувались протягом перерви в осадконагромадженні, яка тривала в межах розвитку Зовнішньої зони Передкарпатського прогину біля 45 млн., років від датського часу пізньої крейди до початку міоцену. За цей період на місці формування Передкарпатського прогину утворилась складно побудована палеогеоморфологічна система, представлена зонами розвитку захоронених долин древніх палеорусел. Притальвегові частини більшості з них захоронені під насувними елементами Карпатської споруди, де опущені по каскаду повздовжніх скидів. На це вказує поперечна зональність розвитку ділянок з підвищеною піскуватістю в аллохтонному флішевому розрізі Внутрішньої зони Передкарпатського прогину та Карпат. В автохтонній частині прогину найбільш виражені Ходорівська та Коломийська палеодолини, ускладнені сіткою глибоких палеоврізів та палеоприток, більшість з яких зароджені в межах платформи.

Повертаючись до питання природи північно-східного схилу Крукеницької западини слід звернути увагу на те, що центральне русло Ходорів-

ської палеодолини, тальвег якого орієнтований в сторону западини під кутом 70° , по мірі наближення до північно-східного краю останньої за даними сейсморозвідувальних робіт та глибокого буріння трансформується у вузький глибокий палеовріз, який перед утворенням розривних дислокацій Передкарпатського розлому міг утворювати з нею спільну палеогеоморфологічну систему (рис. 2) [2,10].

На початку міоцену менш виражені ерозійні врізи зароджені вздовж південно-західного краю Косівсько-Угерської підзони між Свідницько-Судовошишнянською, Орховицько-Дубаневиською, Макунівською і Колбаєвицько-Чайковицькою, Погірцівською і Подолецькою, Північно-Грушівською і Грушівсько-Опарською та іншими групами локальних структур. Тальвеги палеоврізів направлені в сторону Крукеницької западини, проте всі вони поширені тільки в смузі помірного нахилу північно-східної прибортової частини западини і в поперечному перетині поступово розширюються та нівелюються по мірі зростання крутизни регіонального схилу.

Найбільш детально структурні особливості смуги крутого занурення донеогенової основи вивчались глибоким бурінням в Залужанському перетині на ділянці Сусолів-Майничі. Тут, не зважа-

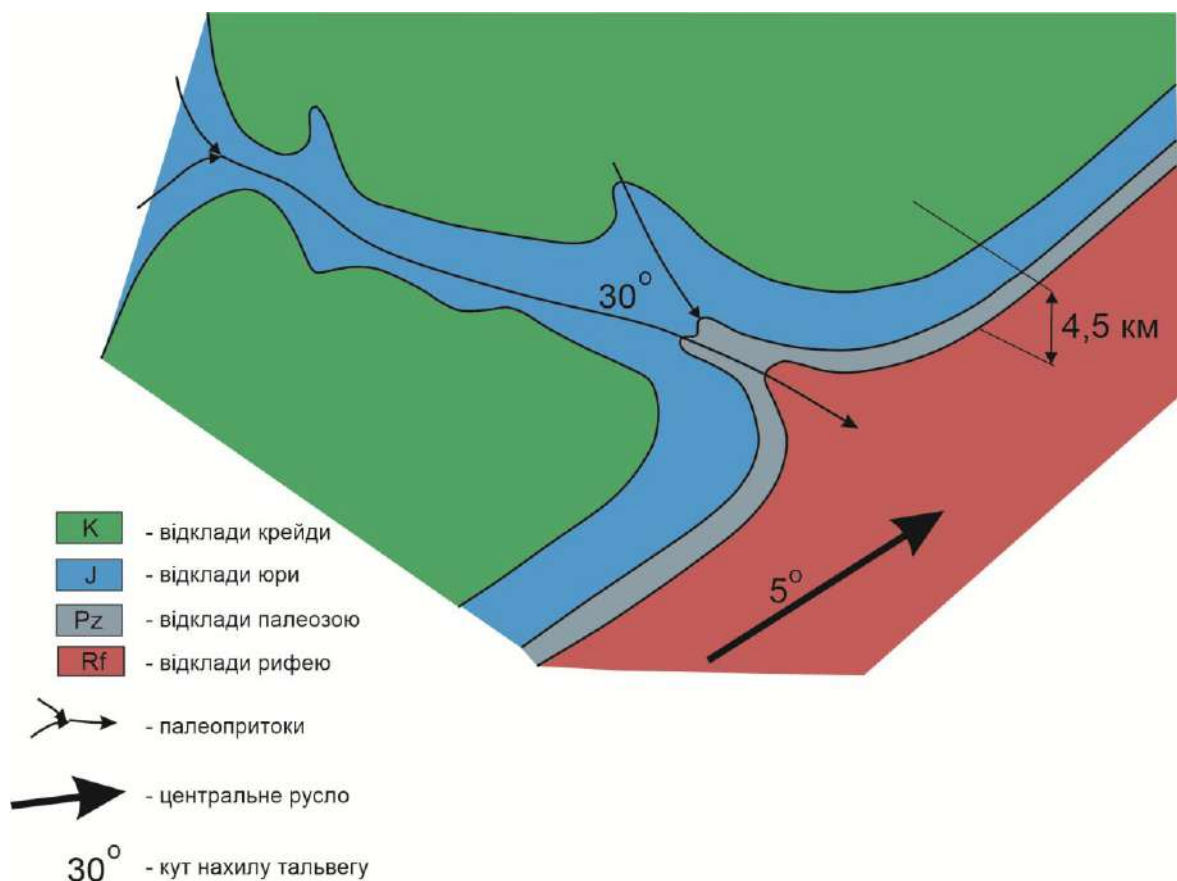


Рис. 2. Палеогеоморфологічна схема вузла злиття Крукеницького і Ходорівського донеогенових палеоорусел [2] / Fig. 2. Paleogeomorphological diagram of the junction of the Krukenytsky and Khodorivsky pre-Neogene paleochannels [2]

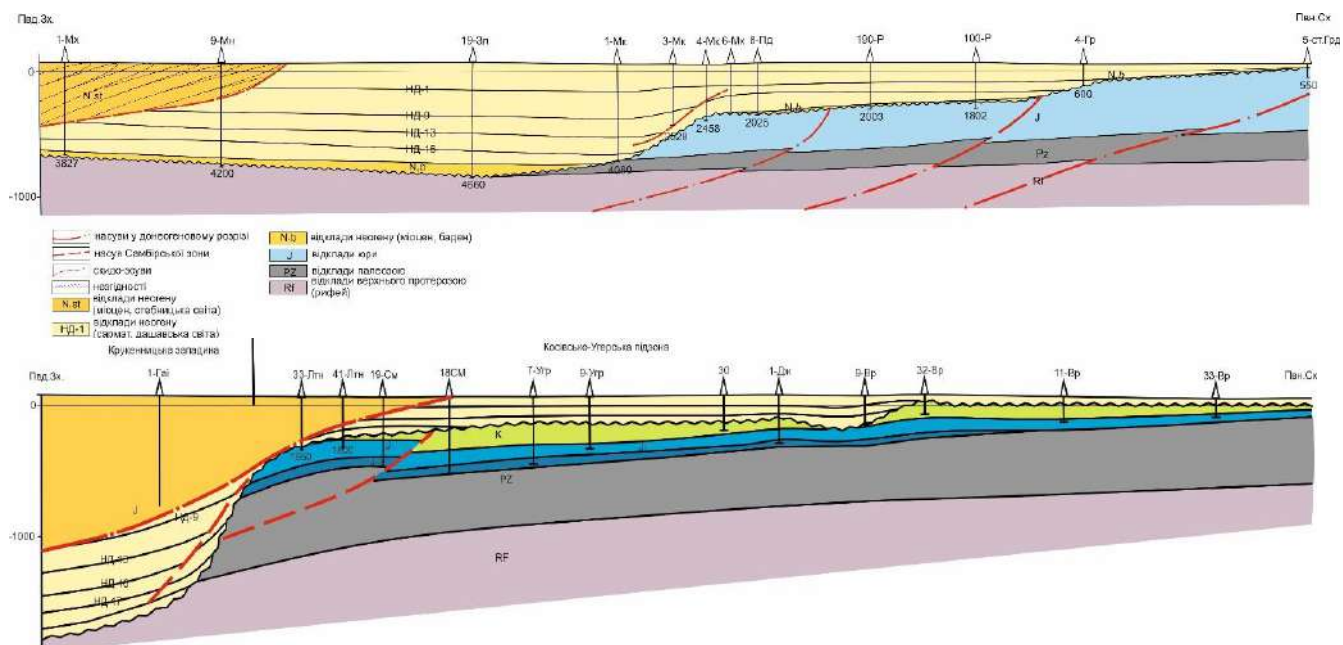


Рис. 3. Поперечні геологічні розрізи Зовнішньої зони Передкарпатського прогину по лініях: а) Михайлеви́чі-Городок, б) Гаї-Вербі́ж [авт.] / Fig. 3. Cross-sectional geological sections of the Outer Zone of the Precarpathian Trough along the lines: a) Mykhaylevychi-Horodok, b) Gai-Verbizh [auth.]

ючи на значні перепади абсолютних відміток, від свердловини до сбувердловини з поглибленням дна неогенового басейну осадконагромадження

простежується поступове зростання віку порід, що виходять на донеогенове ложе.

Подібна картина простежується вздовж всьо-

го північно-східного схилу Крукеницької западини, зокрема на ділянках Оселя, Кароліна, Ніковичі, Макунів, Дубаневичі, Грушів, де по мірі занурення, на поверхні донеогенового розмиву верхньоярські відклади змінюються нижньоярськими, а ті в свою чергу – палеозойськими, що незгідно залягають на метаморфізованих утвореннях рифею. На крутих схилах розмиву, вузькі повздовжні смуги виходу на донеогенову поверхню порід окремих стратиграфічних підрозділів у багатьох випадках пропущені глибоким бурінням що справляє хибне враження про наявність різноамплітудних повздовжніх розривних дислокацій скидового типу (рис. 3).

В північно-західному напрямку при наближенні до кордону з Польщею крутизна та амплітуда північно-східного схилу Крукеницької западини поступово згасають. Якщо на південному сході, в зоні перетину з Передкарпатським розломом, поверхня донеогенового розмиву за сейсміч-

ними даними залягає на глибинах 6000-6500 м, а крутизна схилу досягає 70° то на північному заході, біля українсько-польського кордону, вона не перевищує 3500 м при крутизні до 40° . На території Польщі відбувається поступове нівелювання Крукеницької западини з омолодженням відкладів донеогенового ложа.

На сучасному структурному плані материкової поверхні Землі аналогом крутого північно-східного схилу Крукеницької западини в деякій мірі може бути бортова частина Великого каньйону, висіченого в осадових шарах пісковика, вапняку і сланцю, а в нижній частині переважно в метаморфічних сланцях і магматичних гранітах, Колорадського плато. Довжина каньйону сягає 446 км, включаючи 96-кілометровий Мармуровий каньйон вгорі за течією. Глибина головної ділянки каньйону досягає 1800 м, ширина – до 29 км. Протягом формування Великого каньйону було зруйновано 4000 км^3 гірських порід [19].

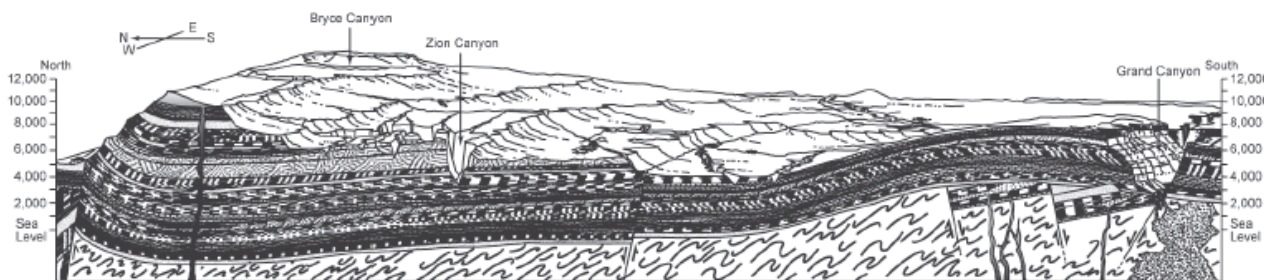


Рис.4 Геологічний розріз через Великий каньйон [19] /

Fig. 4 Geological section through the Grand Canyon [19]

В розрізі Великого каньйону приймають участь (знизу - вверху): кристалічні породи фундаменту, похилі шари осадових порід і верхня товща горизонтально залягаючих порід, які перекривають все плато і, в деяких випадках, значну територію північноамериканського континенту (рис. 5). Протягом формування Великого каньйону було зруйновано 4000 км^3 гірських порід [20].

Існує декілька версій утворення цієї унікальної геоморфологічної споруди сьогодення, які можна об'єднати у дві групи – еволюційні (довготривалі) і катастрофічні (раптові). Перші базуються на дослідженні ерозійної діяльності річкового русла і могли тривати за твердженням різних вчених від 6 до 70 млн. років, як синхронно з підніманням плато, так і після його формування. Другі дослідники за основу приймають раптову, в геологічному відношенні, ерозію. На користь останньої свідчить цілий ряд факторів, серед яких основні наступні:

- відсутність величезної дельти в гирлі річки Колорадо, в якій мала б поміститись значна кількість осадового матеріалу;
- доволі велика стійкість ерозійних останців (масивних скель, складених з осадових порід);

- незначні зміни реліктових форм рельєфу та відсутність в основі скель осипів гірських порід, які б мали нагромаджуватись протягом довготривалого геологічного часу [18].

Повертаючись до історії формування Крукеницької западини як і крупних ерозійних долин і палеоврізів в межах припіднятої частини Зовнішньої зони Передкарпатського прогину, з кристалічними породами фундаменту можна порівняти філітізовані сланці рифею, похилі шари – це нерозчленований розріз палеозою, який має локальне поширення і зі стратиграфічним та кутовим неузгодженням перекриває метаморфізовану товщу рифею, а верхні шари – це в різній ступені дислоковані теригенно-карбонатні утворення нижньої і середньої юри, перекриті частково розмитим, в основному карбонатним комплексом верхньої юри та теригенно-карбонатними шарами нижньої і пізньої крейди [2, 10, 11].

Суттєвою відмінністю між Великим каньйоном і Крукеницькою западиною є те, що перший утворився в умовах спокійного майже горизонтального залягання порід, в той час як донеогенове ложе автохтонної частини Передкарпатського прогину формувалось в межах смуги розвитку

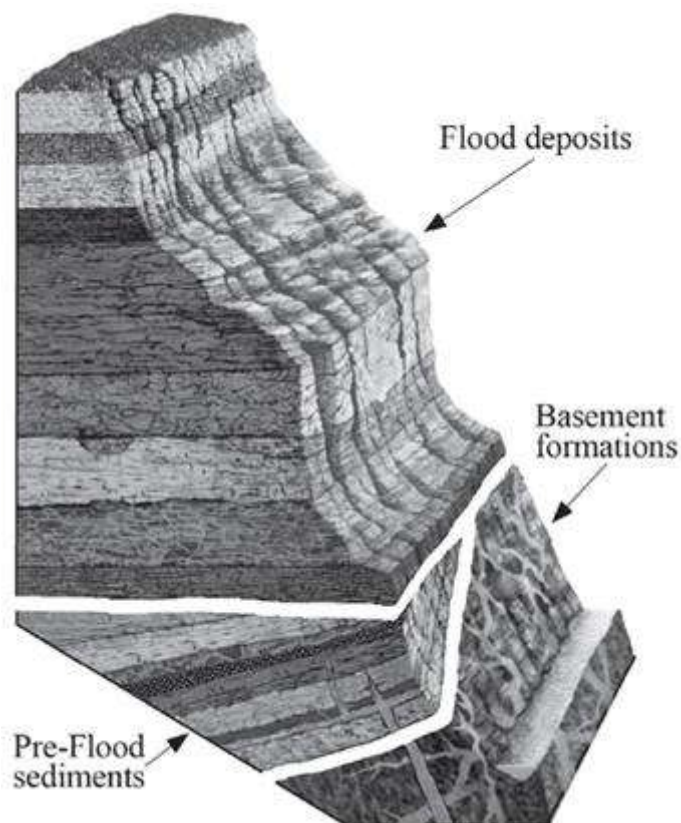


Рис. 5. Схематичний розріз прибортової частини Великого каньйону [20] /

Fig. 5. Schematic section of the rim of the Grand Canyon [20]

складчастих дислокацій, що у значній мірі позначились, в першу чергу, на зниженні стійкості порід та привело до розвитку обширних річкових меандр. Вниз по течіях палеоруслу поглиблювались і частково випрямлялись вздовж регіональних тектонічних порушень більш древнього заложення.

Утворення ерозійних форм донеогенового ложа Зовнішньої зони прогину розпочалося на завершенні крейдового періоду, про що свідчить наявність в розрізі стрийської світи гальки екзотичних порід різного віку.

В подальшому воно проходило в кілька етапів, що підтверджується утворенням в донеогеновому ложі ряду протяжних палеотерас з виходом на розмиту поверхню різновікових порід. Протягом палеогенового часу ерозійні процеси в межах Передкарпаття відбувались циклічно, по мірі опускання флішового басейну. Це підтверджується наявністю в осадовому комплексі різноокатаних уламків більш древніх порід. Так у строкатокільному горизонті ямненської світи палеоцену Внутрішньої зони Передкарпатського прогину та Скибової зони Карпат встановлені гравійні і дрібногалькові конгломерати, складені із уламків зелених сланців і філітів рифею, зелених метаморфізованих пісковиків і алевролітів, темно-сірих аргілітів, кварцитів, мергелів і пісковиків палеозойського, нижньо- та середньоярського віку а

також верхньоярських та верхньокрейдових вапняків, також зустрічаються перевідкладені уламки порід крейдового флішу. В розрізі вигодської світи еоцену в межах Внутрішньої зони зустрічаються зелені рифейські філіти, алевроліти кембрію, силурійські аргіліти і пісковики, мергелі, конгломерати та гравеліти, верхньоярські вапняки. Розріз бистрицької світи в основній масі складений з аргілітів, зелені філіти зустрічаються рідше. Нижня частина нижньомелітової підсвіти олігоцену збагачена верствами гравелітів, складених уламками рифейських зелених сланців і філітів, метаморфізованих пісковиків і алевролітів, а також юрських вапняків [14].

Палеогеновий період розвитку палеорічкової системи в межах сучасного положення Зовнішньої зони Передкарпатського прогину відбувався відносно у спокійних тектонічних умовах. Він ознаменувався утворенням мілкої рівнинної річкової системи, ускладненої багаточисельними притоками та меандрами річкових русел основні, серед яких Крукеницька, Ходорівська, Коломийська, Красноільська та інші. Більш активно ерозійні процеси відбувались по мірі наближення до флішового басейну. Період еволюційного розвитку ерозійної системи Зовнішньої зони Передкарпатського прогину завершився створенням розгалуженої системи палеорусел з відносно пологими палеосхилами та обширними палеотерасами орі-

ентованими, в основному, вздовж древніх тектонічних порушень [5-8].

Другий період формування донеогенового ложа Зовнішньої зони Передкарпатського прогину в геохронологічному відношенні досить короткотривалий. Він пов'язаний з активним підняттям форланду протягом егер-оттангського часу і нагромадженням в нижньомоласовому басейні в розрізі поляницької і воротищенської та низах стебницької світ товщі конгломератів, складених, в основній масі, з відкладів рифею, юри та крейди. Пізніше основним джерелом зносу були флішові утворення Карпат [6].

Цей період розвитку автохтонної частини Передкарпаття позначився значною активізацією ерозійних процесів, утворенням на місці притальвегових частин палеорусел глибоких каньйоноподібних врізів. У верхньомоласовому басейні седиментації протягом досить стислого егер-егенбургського часу міоцену відбулось нагромадження потужної осадової товщі, в розрізі якої значну частину займають екзотичні конгломерати. Найбільш поширені з них – слобідські, складені з уламків зелених хлорит-серецит-кварцових, і кварцових сланців, філітів, кварцитів. Основну масу уламкового матеріалу складають зелені метаморфічні сланці. Магматичні і жильні породи представлені порфірами, діабазами, молочно-білим і димчастим кварцом. Уламки осадових порід – це, в основному, пісковики уламки конгломератів типу «веррукано», червоні і фіолетові бітумінозні аргіліти, органогенні вапняки, доломіти, дуже рідко червоні кремні і «роговики» менілітового типу. Основним джерелом постачання осадового матеріалу був автохтонний комплекс Передкарпаття, молода Карпатська споруда при цьому мала підпорядковане значення.

Цей період розвитку ерозійної системи Зовнішньої зони Передкарпатського прогину можна порівняти з утворенням Колорадського каньйону, допускаючи його досить стисле в геологічному часі формування.

Суттєвим фактором, що характерний як для Великого Каньйону так і крайової смуги Крукеницької западини, включаючи крупні ерозійні врізи припіднятого мегаблоку Зовнішньої зони Передкарпатського прогину, є наявність малозмінених захоронених ерозійних останців, складених з міцних порід. Для Крукеницької западини – це філітизовані сланці, а для її схилу і припіднятої частини прогину – органогенні і хемогенні вапняки та доломіти [1].

В основі крутих схилів відсутні уламки або осипи гірських порід. Підніжжя каньйону занадто «чисті», з дуже невеликою кількістю насипів. Протягом мільйонів років ерозії біля підніжжя скель в Гранд-Каньоні можна було б очікувати

велику кількість порід при відсутності активного джерела води для видалення матеріалу. Подібне простежується і в підніжжі крутого північно-східного схилу Крукеницької западини та вздовж ерозійних врізів припіднятої частини Передкарпатського прогину, де безпосередньо на розмитій поверхні залягають піщано-алевролітові відклади нижнього бадену або перешарування хемогенних і теригенних утворень середнього бадену.

Як в гирлі річки Колорадо, так і основного русла Крукеницької палеоріки відсутні великі за розмірами дельти в яких мали б поміститись значні об'єми осадового матеріалу. В нашому випадку – це, в основному, міцних карбонатних порід юрського і теригенно-карбонатних утворень крейдового віку. Проте, в насунутому комплексі Карпатської споруди вони мають підпорядковане значення.

Висновки. Підсумовуючи вище сказане можна припустити, що формування складнобудованої ерозійної системи Зовнішньої зони Передкарпатського прогину, включаючи Крукеницьку западину, відбувалось в кілька етапів. На початку це був еволюційний період розвитку, що проходив у відносно спокійних геологічних умовах, про що свідчить наявність підпорядкованого вмісту верхньоярського карбонатного матеріалу в різновікових екзотичних конгломератах від верхньокрейдових до олігоценів.

Другий період формування донеогенового ложа Зовнішньої зони Передкарпатського прогину в геохронологічному відношенні короткотривалий. Він пов'язаний з активним підняттям форланду протягом короткотривалого часу і нагромадженням в нижньомоласовому басейні грубоуламкових осадів, складених, в основній масі, з відкладів рифею, юри та крейди. Пізніше основним джерелом зносу були флішові утворення Карпат.

Цей період розвитку автохтонної частини Передкарпаття позначився значною активізацією ерозійних процесів, поглибленням Крукеницької палеодолини, з поступовим зміщенням притальвегової частини основного палеорусла в напрямку Краковецької системи регіональних скидів, заложеної у донеогеновий час. При цьому утворювався крутий уступ, ускладнений по простяганням серією каньйоноподібних врізів. Останні формувались на продовженнях палеорусел, зароджених в межах палеовисочин припіднятого мегаблоку. Їхні пригирлові частини поступово мігрували на північний схід синхронно зі зміщенням крутого берега Крукеницького регіонального палеорусла утворюючи ряд водоспадів, що позначились утворенням в підніжжі складнобудованого регіонального уступу асиметричних ерозійних западин з пологими південно-західними і

крутими північно-східними палеосхилами.

Баден-сарматський період розвитку Крукеницької западини як і всієї Зовнішньої зони Передкарпатського прогину супроводжувався регіональною трансгресією з нагромадженням потужної товщі баден-сарматських, в основному, теригених відкладів. Створена в ранньому міоцені ерозійна система на ділянках, не втягнутих в процеси

пізньоальпійського орогенезу, зберегла свої основні структурні риси під товщею верхніх молас.

Представлені уявлення про формування до-неогенового ложа можуть бути використані при структурному моделюванні продуктивних горизонтів баден-сарматської товщі північно-східної прибортової частини Крукеницької западини з метою виділення газоперспективних об'єктів.

Список використаних джерел

1. Андрейчук М. М. (2012). Роль донеогенових ерозійних процесів у формуванні структурних елементів Зовнішньої Зони Передкарпатського прогину. *Вісник Львівського університету, Сер. Геол.* (26), 212-220.
2. Андрейчук М. (2013). *Особливості геологічної будови і пастки вуглеводнів Зовнішньої зони Передкарпатського прогину: автореф. дис. канд. геол. наук 04.00.17.* Михайло Андрейчук, 20.
3. Вишняков І. Б., Ващенко В. О., Гаврилко Г. А., Гоник О. В. (2000). *Природа Коломийсько-Заболотівської русловидної структури. Геологія і геохімія горючих копалин*, 3-12.
4. Глушко В. В. (1968). *Тектоника и нефтегазоносность Карпат и прилегающих прогибов. «Недра»*, 263.
5. Гневуш В. В., Бодлак П. М., Андрейчук М. М., Петровський Д. Л. (2007). *Перспективи пошуків родовищ вуглеводнів у межах системи врізів на прикладі – Старобогородчанського родовища. Геологія і геохімія горючих корисних копалин. Геологі і геохімія горючих корисних копалин*, 25-32.
6. Гуржий Д. В. (1969). *Литология моласс Предкарпатья. К.: «Наукова думка»*, 4.
7. Заяць Х. (2013). *Глибинна будова надр Західного регіону України на основі сейсмічних досліджень і напрямки пошукових робіт на нафту та газ*, 136.
8. Котик В. А. (1968). *О связи палеорельефа с развитием Предкарпатского прогиба. Нефтегазовая геология и геофизика. Науч. сб. ВНИИОЭНГ*, 50-53.
9. Крупський Ю. (2001). *Геодинамічні умови формування і нафтогазоносність Карпатського та Волино-Подільського регіонів України*, 144.
10. Крупський Ю. З., Андрейчук М. М., Чепіль П. М. (2006). *Обстановки осадконагромадження в міоцені Зовнішньої зони Передкарпатського прогину і нафтогазоносність. Геологічний журнал*, 27-41.
11. Крупський Ю. (2020). *Геологія і нафтогазоносність Західного регіону України*, 256.
12. Ксенкевич М., Самсонович Я., Рюле Э. (1968). *Очерк геологии Польши*, 310.
13. Лазарук, Я., Заяць, Х., & Побігун, І. (2013). *Гравітаційний тектогенез Більче-Волицької зони Передкарпатського прогину. Геологія і геохімія горючих копалин. 1-2 (162-163)*, 5-16.
14. Маєвський Б. Й., Жученко Г. О., Мончак Л. С. та ін. (2004). *Сучасний погляд на геодинамічні процеси та конгломератоутворення у Передкарпатському прогині. Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. 2 (11)*, 56-59.
15. Утробин В. Н. (1960). *Основные черты морфологии, гипсометрии и генезиса дотретичной поверхности Внешней зоны Предкарпатского прогиба и югозападной окраины Русской платформы. 130, 2*, 396-399.
16. Утробин В. Н. (1958). *Особенности тектонического строения Внешней зоны Предкарпатского прогиба. Геологический сборник Львовского геологического общества. 5-6*, 25-42.
17. Федущак М. Ю. (1962). *Умови утворення екзотичних конгломератів воротищенської серії Передкарпаття. 112*.
18. Bretz J.H. (1923). *Glacial Drainage of the Columbia Plateau. Geological Society of America. Bulletin 34*: 573-608.
19. Sloss L.L. (1963). *Sequences in the Cratonic Interior of North America. Geological Society of America. Bulletin 74*: 93-114.
20. Vail T., Oard M.J., Hergenhatter J., and Bokovoy D. (2008). *Your Guide to the Grand Canyon: A Different Perspective. Green Forest, AR: Master Books*, 54.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

An alternative view of the conditions of the formation of the pre-Neogene bed of the Krukenychi depression

Ihor Mykhailovskyi¹

¹ LLC «BURPROEKT», Lviv, Ukraine,

Mykhailo Andreychuk²

² PE "GEOBURPROEKT", Lviv, Ukraine

ABSTRACT

Purpose. The Krukenytsk Depression is considered a deep erosional valley formed at the beginning of the Miocene. A comparison of the pre-Neogene paleo-relief of the northwestern Outer Zone of the Pre-Carpathian Trough with the modern structural plan of the surface of the Grand Canyon carved out of the sedimentary layers of the Colorado Plateau is given. An assumption is made about the erosive nature of the narrow strip of articulation of the Krukenytsk Depression with the hypsometrically uplifted Kosiv-Ugrian Subzone of the Outer Zone of the Pre-Carpathian Trough.

Method. Based on comprehensive geological and geophysical studies, the Krukenytsia Depression is presented as a component of the Pre-Neogene erosional system of the Outer Zone of the Precarpathian Trough. The main factor in the formation of discontinuous and plicative faults is considered to be gravitational forces, which is the basis for new views on the formation of hydrocarbon traps in the upper molasses section. The purpose of the study is to identify the influence of Pre-Neogene erosional processes on the formation of paleogeomorphological features of the Pre-Neogene bed of the northeastern marginal part of the Krukenytsia Depression.

Results. The Krukenytsia Depression differs from the adjacent Kosiv-Uhersk subzone of the Outer zone of the Precarpathian Depression, primarily, in the depths of the pre-Neogene basement, which became the main factor in the abrupt increase in the thickness of the Miocene complex, represented mainly by terrigenous formations of Badenian-Sarmatian age, which, within the depression, overlap strongly dislocated and metamorphosed Riphean formations with an angular and stratigraphic unconformity. The Mesozoic and Paleozoic complexes in the pre-Neogene basement of the Ukrainian part of the Krukenytsia Depression are absent and appear, gradually rejuvenating the latter only on the steep northeastern slope and within its origin in Poland. According to the existing model, the Krukenytska Depression is represented as a megablock of the autochthonous part of the Precarpathian trough submerged along the Krakovets fault, within which the Miocene Upper Molasses complex with stratigraphic and angular unconformity overlies metamorphosed and dislocated Riphean rocks.

Scientific novelty. In the pre-Neogene base of the Outer zone of the Precarpathian trough, the northeastern margin of the Krukenytsia depression is first presented as a steep longitudinal slope of a deep erosional paleovalley, complicated by numerous elements of gravity slides of the Meso-Paleozoic stratum. The dominant role in the formation of the block structure of the studied area is first assigned to the forces of gravity in conjunction with the paleogeomorphological features of the pre-Neogene bed.

Practical significance. The obtained data allow us to assess in a new way the conditions for the formation of hydrocarbon traps, both in the Miocene terrigenous complex and in the rocks of the pre-Neogene base of the northeastern marginal part of the Krukenytsia depression in order to conduct more targeted geological exploration work in this area of the Outer zone of the trough.

Keywords: deflection, depression, abutment, tectonic disturbances, denudation, erosion surface.

References

1. Andreychuk M. M. (2012). *The role of pre-Neogene erosional processes in the formation of structural elements of the Outer Zone of the Precarpathian Depression*. Bulletin of Lviv University, Ser. Geol., 212-220.
2. Andreychuk M. (2013). *Peculiarities of the geological structure and hydrocarbon traps of the Outer zone of the Precarpathian trough: author's abstract*. dissertation candidate of geol. sciences 04.00.17. Mykhailo Andreychuk, 20.
3. Vyshnyakov I. B., Vashchenko V. O., Gavrylko G. A., Gonyk O. V. (2000). *Nature of the Kolomyia-Zabolotiv channel-like structure*. Geology and geochemistry of combustible minerals. 1, 3-12.
4. Glushko V.V. (1968). *Tectonics and oil and gas potential of the Carpathians and adjacent troughs*. M., Nedra, 263.
5. Gnevush V. V., Bodlak P. M., Andreychuk M. M., Petrovsky D. L. (2007). *Prospects for searching for hydrocarbon deposits within the system of cuts on the example of the Starobogorodchansky deposit*. Geology and geochemistry of combustible minerals, 25-32.
6. Gurzhiy D. V. (1969). *Lithology of molasses of the Ciscarpathian region*. K.: Naukova Dumka, 202.
7. Zayats Kh. (2013). *Deep structure of the subsoil of the Western region of Ukraine based on seismic studies and directions of exploration work for oil and gas*, 136.
8. Kotik V. A. (1968). *On the relationship of paleorelief with the development of the Cis-Carpathian trough*. Oil and Gas Geology and Geophysics. Scientific collection. M., VNIIEONG, 7, 50-53.
9. Krupsky Yu. (2001). *Geodynamic conditions of formation and oil and gas potential of the Carpathian and Volyn-Podilsky regions of Ukraine*, 144.
10. Krupsky Yu. Z., Andreychuk M. M., Chepil P. M. (2006). *Sedimentation conditions in the Miocene of the Outer zone of the Precarpathian trough and oil and gas potential*. Geological Journal, 27-41.
11. Krupsky Yu. (2020). *Geology and oil and gas potential of the Western region of Ukraine*, 256.

12. Ksenkiewicz M., Samsonovich J., Rühle E. (1968). *Essay on the geology of Poland*. M., 310.
13. Lazaruk, Ya., Zayats, Kh., & Pobihun, I. (2013). *Gravitational tectogenesis of the Bilche-Volytskyi zone of the Precarpathian trough. Geology and geochemistry of fossil fuels*. 1-2 (162-163), 5-16.
14. Mayevsky B. Y., Zhuchenko G. O., Monchak L. S., etc. (2004). *Modern view of geodynamic processes and conglomerate formation in the Precarpathian trough. Exploration and development of oil and gas fields*. 2(11), 56–59.
15. Utrobin V. N. (1960). *Main features of the morphology, hypsometry and genesis of the pre-Tertiary surface of the Outer zone of the Cis-Carpathian trough and the southwestern margin of the Russian platform. Reports of the USSR Academy of Sciences*, 130, 2, 396–399.
16. Utrobin V. N. (1958). *Features of the tectonic structure of the Outer zone of the Cis-Carpathian trough. Geological collection of the Lvov Geological Society*. 5-6, 25–42.
17. Fedushchak M. Yu. (1962). *The minds of the creation of exotic conglomerates of the Voroischensky series of Peredkarpattya. K.: Branch of the Academy of Sciences of the Ukrainian Socialist Republic*, 112.
18. Bretz J.H. (1923). *Glacial Drainage of the Columbia Plateau. Geological Society of America. Bulletin* 34: 573–608.
19. Sloss L.L. (1963). *Sequences in the Cratonic Interior of North America. Geological Society of America. Bulletin* 74: 93–114.
20. Vail T., Oard M.J., Hergenrather J., and Bokovoy D. (2008). *Your Guide to the Grand Canyon: A Different Perspective. Green Forest, AR: Master Books*, 54.

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 28 January 2025

Accepted 24 March 2025

Geological interpretation of the wave field in Mesozoic and Cenozoic sedimentary complexes of the transition zone between the South Caspian and Middle Caspian Basins using seismostratigraphic analysis method

Nurlan Namazli¹

PhD Student, Junior Researcher, ¹ Institute of Geology and Geophysics of the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan, e-mail: nurlannamazli@outlook.com,  <https://orcid.org/0009-0008-1838-7932>;

Murad Abdulla-zade²

PhD, Lecturer, ² Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan, e-mail: murad.abdullazade@yahoo.com,  <https://orcid.org/0009-0001-4150-8340>

ABSTRACT

Purpose. This study investigates the tectonic and sedimentary evolution of the transition zone between the South Caspian Basin and the Middle Caspian Basin. The research aims to analyze seismic stratigraphic sequences to improve understanding of the basin's geological history, sedimentary processes, and hydrocarbon potential. It also seeks to clarify the structural features and tectonic mechanisms responsible for the formation and evolution of this complex geological region.

Methodology. The study employs seismostratigraphy, focusing on seismic sequence and seismic facies analysis. Seismic data were analyzed to identify sedimentary structures, stratigraphic sequences, and tectonic features. The seismic sections oriented in north-west-southeast and northeast-southwest directions were divided into ten seismic stratigraphic sequences (SS-1 to SS-10). These sequences were studied to determine their depositional environments, tectonic settings, and reflection characteristics. Seismic facies analysis helped interpret depositional conditions and sedimentary dynamics within each sequence, contributing to identifying structural traps and hydrocarbon reservoirs.

Results. Key Seismic Features: Features such as onlaps, toplaps, pinch-outs, clinoforms, and erosional truncations were identified, suggesting favorable conditions for hydrocarbon accumulation, particularly in SS-3 (Upper Cretaceous), SS-5 (Maikop Series), and SS-7 (Productive Series). Tectonic Evolution: The region's tectonic evolution includes subduction, rifting, and the platform development. These geodynamic processes controlled the sedimentation conditions and structural deformations. Seismic Reflection Patterns: Seismic reflections indicate significant variations in sedimentation rates and depositional environments. For example, Jurassic and Lower Cretaceous sequences (SS-1 and SS-2) show chaotic and discontinuous reflections, while Late Pliocene and Quaternary sequences (SS-8 and SS-10) have continuous, high-amplitude reflections, suggesting contrasting depositional conditions. Tectonic Influence: Evidence of syn-sedimentary tectonics, including fault-related deformation and subsidence-driven sedimentation, was observed, emphasizing tectonic activity's role in shaping the region's stratigraphy and influencing hydrocarbon distribution.

Scientific Novelty. The study offers new insights into the tectonic and sedimentary history of the transition zone of the South Caspian Basin and the Middle Caspian Basin. It refines existing theories regarding the basin's formation by integrating seismostratigraphy with geological interpretations. The research advances the understanding of subsurface structural complexities, highlighting the interaction of tectonic forces and sedimentary processes in shaping the region's geological framework.

Practical Significance. The findings have significant implications for oil and gas exploration. Key geological structures such as pinch-out zones, onlap unconformities, and erosional truncations provide critical information for hydrocarbon exploration. Particularly, the Upper Cretaceous and Oligocene-Miocene sections show favorable conditions for non-anticlinal traps, suggesting promising exploration targets. The study also highlights the role of tectonic activity in reservoir formation and distribution, aiding future exploration and drilling efforts in the region.

Keywords: South Caspian basin, Middle Caspian basin, seismostratigraphic analysis, reflection, seismic sequences, seismic facies analysis, seismic sections, sediments.

In cites: Namazli Nurlan, Abdulla-zade Murad (2025). Geological interpretation of the wave field in Mesozoic and Cenozoic sedimentary complexes of the transition zone between the South Caspian and Middle Caspian Basins using seismostratigraphic analysis method. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series "Geology. Geography. Ecology"*, (62), 95-103. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-07>

Introduction. This study focuses on the western flank of the transition zone between the South Caspian Basin (SCB) and the Middle Caspian Basin (MCB). Tectonically, this region represents the marine extension of the southeastern termination of the Greater Caucasus Meganticlinorium [17] (Fig.1).

The question of the timing and mechanism of the SCB formation has long been a subject of debate, with several theories proposed regarding its genesis. One perspective suggests that this basin is a relic of

the Greater Caucasus-South Caspian-Kopetdagh marginal sea (also referred to as the Greater Caucasus marginal sea) and represents a product of back-arc rifting and spreading associated with the development of a magmatic arc. The buried structure of this arc is well-imaged on seismic profiles, extending from Talysh through the Saatly-Geychay-Mingachevir Mesozoic uplift zone and further beneath the Alazani Valley towards the Black Sea [29].

Another hypothesis posits that the SCB formed

as a result of the closure of the Mesozoic Tethys Ocean [15,16].

Another perspective views the SCB as an oceanic pull-apart structure formed through rifting along a Late Cretaceous strike-slip zone parallel to the Caucasus and Kopetdagh [24].

A different hypothesis interprets the SCB's formation as a result of meridional rifting. Additionally, it has been suggested that the SCB could have emerged due to the densification of mafic rocks in the lower part of the continental crust, driven by a phase transition from gabbro to eclogite, leading to increa-

sed density and subsidence [5].

Despite the abundance of theories, the insights from ultra-deep seismic sounding using the Common Depth Point (CDP) method cannot be overlooked. These data reveal rift-related extensional structures on the marginal part of the Turan Plate in the Central Caspian, a buried volcanic island arc in the Kura Depression, the subduction of thin oceanic crust beneath the thick (25–28 km) sedimentary cover of the SCB, and the complexly deformed accretionary prism structures with associated compressional features [10].

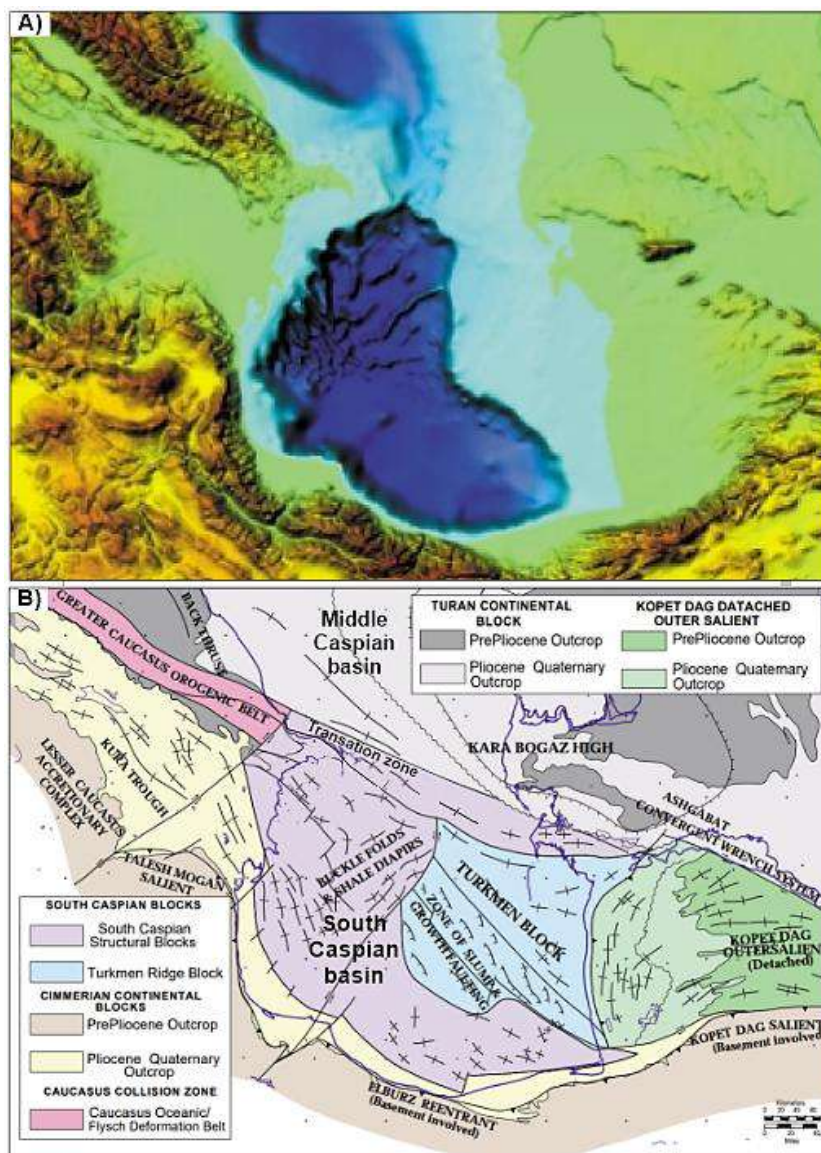


Fig. 1. A) Combined bathymetric and topographic map of the South Caspian Sea and its surrounding regions. The elongated subsea ridges visible in the bathymetry correspond to prominent anticlinal folds beneath the seafloor; B) Key structural features of the South Caspian Sea and adjacent areas [adapted from 3, 6, 11, 21, 22, 26]

The convergence zone between the SCB and the MCB, recognized as the primary oil and gas generating area of the region, has been a subject of research for several decades [2]. The SCB, characterized by the Absheron-Prebalkhan tectonic zone, originated

and evolved within the Alpine-Himalayan orogenic belt. The sedimentary fill of the SCB remains relatively undeformed in certain areas compared to the neighboring folded and thrust complexes of the Caucasus, Kopetdagh, and Elburz regions (Fig. 1).

The South Caspian lithosphere is believed to subduct beneath the continental lithosphere of the MCB in this area [1, 8, 9, 13, 14, 18]. The formation of the SCB is attributed to various periods, including the Paleocene, Late Jurassic, and Early Mesozoic [12]. The SCB's sedimentary fill comprises over 20 kilometers of Mesozoic to Cenozoic deposits [7].

Materials and methods. Seismostratigraphy was employed as the primary method in this study. This geological technique is widely used for the

stratigraphic interpretation of seismic data. Seismic reflections are generated from physical surfaces that exhibit abrupt changes in properties such as density and velocity, with unconformity and stratification surfaces serving as key boundaries between layers [4, 20, 27]. The analysis involves both seismic sequence analysis and seismic facies analysis [23, 25]. To achieve the study's objectives, seismic sections from the research area were divided into seismic sedimentation complexes.

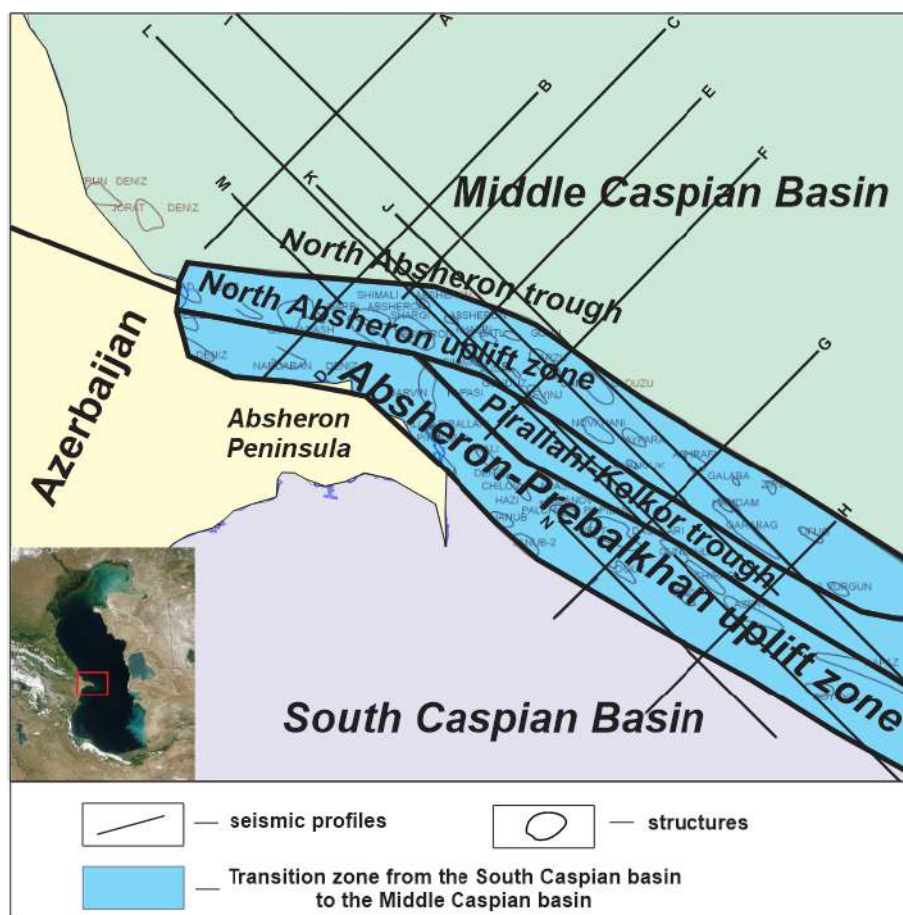


Fig. 2. Location of the study area and the arrangement of seismic profiles

These sections, oriented in the northwest-southeast and northeast-southwest directions, were analyzed to identify ten seismic stratigraphic sequences [19]. Seismic facies analysis was conducted by evaluating the dynamic parameters of seismic reflections within each sequence.

Results and discussion. In the article, seismic sections along 14 seismic profiles in the study area have been analyzed. The seismic profiles and their corresponding seismic sections have been conventionally named from A to N (Fig. 2). The seismic sequences are denoted by the abbreviation "SS" in the article (Fig. 3).

SS-1 and SS-2: These sequences represent Jurassic and Lower Cretaceous sediments. SS-1 marks the period of rift basin formation and opening. During the Late Jurassic, a marine transgression was

actively progressing, accompanied by further basin expansion. Time seismic sections provide a clear view of the development of shelves and continental slopes during the process of sea expansion and platform margin inundation in the Middle Jurassic.

The Cretaceous surface exhibits an uneven relief, and in the lower part of SS-2, distinct clinoforms characteristic of carbonate escarpments along the shelf edge are identified. The irregular surface of the reflective boundaries observed in this interval is typical of deposits accumulated in shallow-water basins. Tracing reflections within these sequences is challenging due to their chaotic, low-to-medium amplitude and discontinuous nature (Fig. 4A). Some sections exhibit semi-continuous reflections, particularly near the upper boundary, which are likely associated with volcanogenic-carbonate deposits (Fig. 4B).

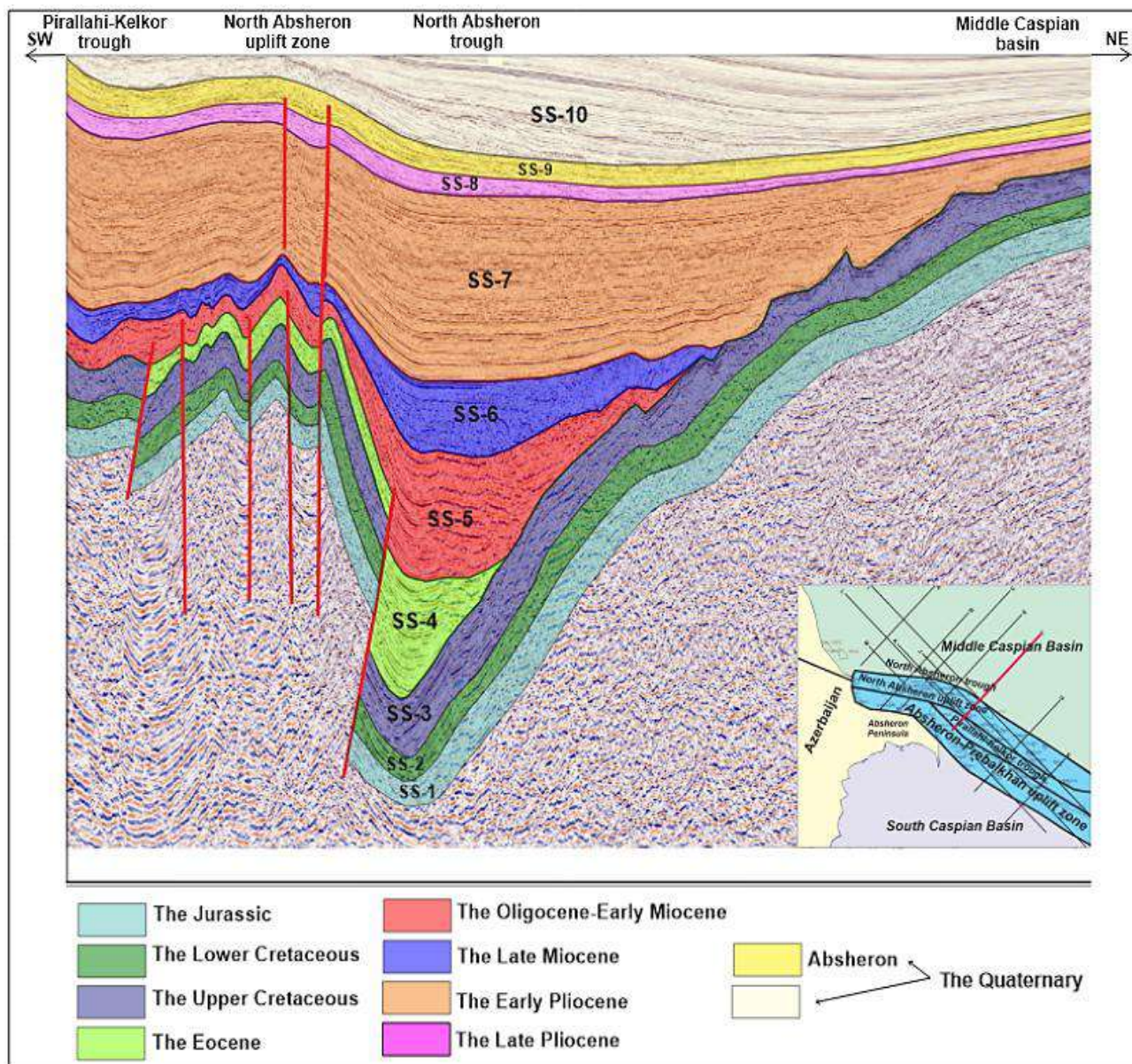


Fig. 3. Seismic sequences (SS) separated within the seismic section along the southwest-northeast oriented "F" profile within the study area

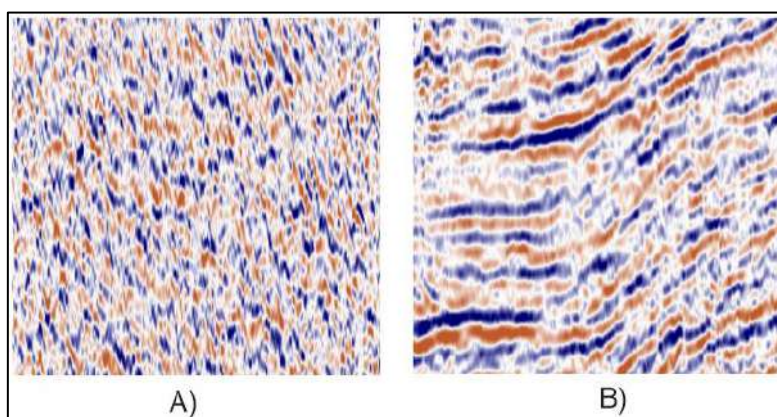


Fig. 4. A) Chaotic (seismic section "A") and B) semi-continuous (seismic section "B") seismic reflections within Jurassic and Lower Cretaceous sediments

SS-3: This sequence corresponds to Upper Cretaceous sediments. It is characterized by two distinct

phases: low-to-medium amplitude, subparallel, and discontinuous reflections near the lower boundary

(Fig. 5A), transitioning to high-amplitude, continuous reflections near the upper boundary (Fig. 5B). The sea-level drop in the shelf zone led to active rock erosion, contributing to the formation of erosional truncations. Such areas are evident on the eroded

surfaces of Upper Cretaceous deposits. Onlap unconformities are evident along the upper boundary, indicative of falling sea levels [28]. Pinch-out zones are observed above SS-3 (Fig. 5C).

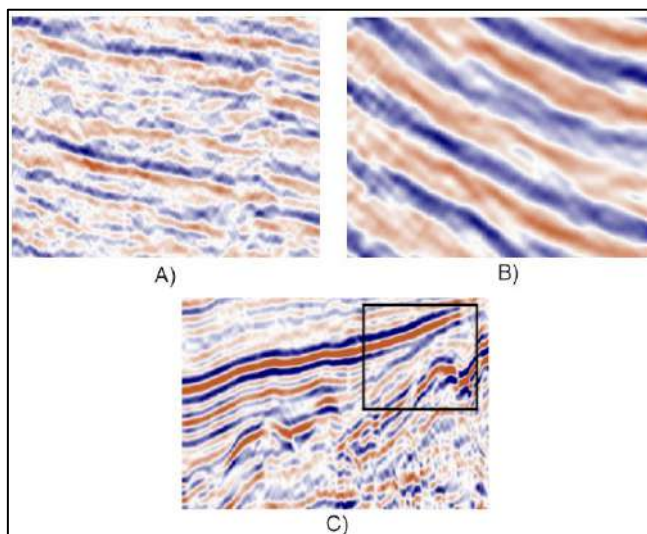


Fig. 5. A) Low-to-medium amplitude, subparallel, and discontinuous reflections (seismic section “N”);
B) high amplitude, continuous reflections (seismic section “B”);
C) pinch-out zones (seismic section “G”) within Upper Cretaceous sediments

SS-4: Representing Eocene sediments, SS-4 lies on Upper Cretaceous deposits in the northern part of the study area. The reflections within SS-4 are weaker in amplitude and frequency compared to the overlying and underlying sequences (Fig. 6A). Paleocene and Eocene deposits lie on the eroded Cretaceous surface in the northern and north-northeastern parts of the area. The Eocene interval is predomi-

nantly represented by clayey lithofacies, though dense sandstones and fine-grained sands are occasionally encountered. Compared to the Cretaceous and Maikop (Oligocene-Early Miocene) deposits, the Eocene deposits display lower reflection frequency and weaker reflection amplitude. Pinch-outs of Eocene sediments are observed in both the northeastern and north-northeast profiles (Fig. 6B).

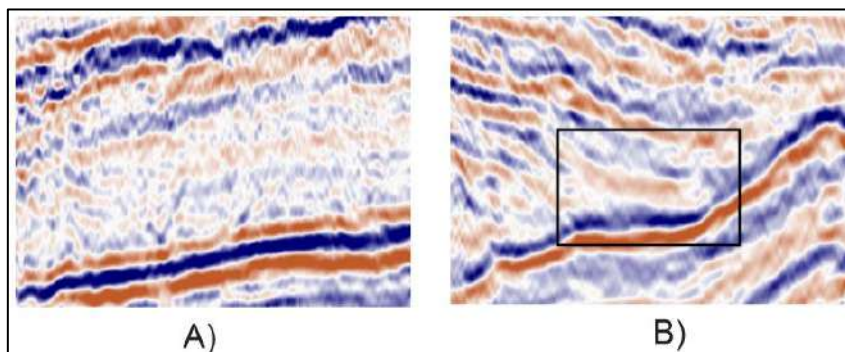


Fig. 6. A) Weak amplitude reflections (seismic section “G”) and
B) pinch-outs (seismic section “K”) observed within Eocene sediments

SS-5: This sequence represents the Maikop Series (Oligocene-Early Miocene). Seismic reflections within SS-5 are predominantly medium- to high-amplitude, parallel, and semi-continuous (Fig. 7A). Chaotic reflections occur in areas affected by tectonic faults and uplifts (Fig. 7B). The Maikop deposits are primarily represented by clayey lithofacies, as well as sandy-carbonate clays, dense sandstones, and thin

interlayers of clay. A detailed analysis of time sections reveals that during the Oligocene-Early Miocene period, the Absheron-Prebalkhan threshold was a zone of relative uplift, separating the South Caspian subsidence area from the Middle Caspian region. Pinch-outs of Maikop sediments overlying Upper Cretaceous deposits are noted in both regional profiles (Fig. 7C).

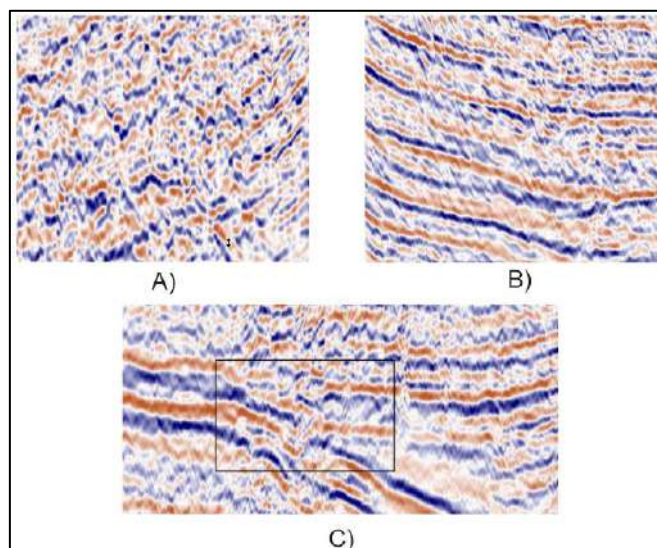


Fig. 7. A) Chaotic reflections (seismic section “J”); B) Medium-to-high amplitude, parallel, and semi-continuous reflections (seismic section “K”); C) pinch-out zones (seismic section “F”) within Oligocene-Early Miocene sediments

SS-6: Corresponding to Late Miocene sediments, SS-6 shows nearly uniform thickness across the study area. Near its lower boundary, continuous, subparallel reflections become increasingly chaotic upward, suggesting a high sediment influx during this period (Fig. 8A). In terms of reflection intensity, density, and configuration on time sections, this seismic complex differs both from the Maikop SS-5, repre-

sented by lower fine-clastic molasses, and from the overlying seismic complexes associated with the Meotian-Anthropogenic upper coarse-clastic molasses. Erosion truncations at the upper boundary indicate a sharp sea-level drop towards the end of the Miocene. In some sections, synclinal-shaped "hollows" are observed, which may correspond to paleo-riverbeds (Fig. 8B).

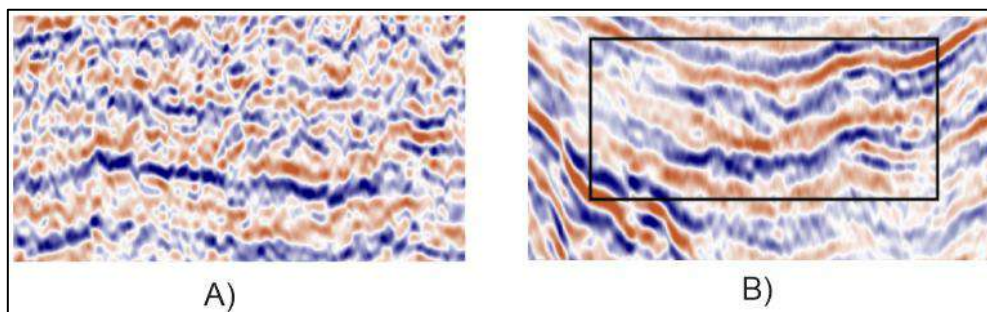


Fig. 8. A) Subparallel and chaotic reflections (seismic section “H”); B) synclinal-shaped "hollows" (seismic section “T”) within Late Miocene sediments

SS-7: This sequence represents the Productive Series (Early Pliocene) sediments. Reflections within SS-7 are medium-to-high amplitude, parallel, and continuous, with weaker amplitudes near the lower boundary (Fig. 9A). Analysis of seismic dynamics suggests deep-water basin sedimentation, with a higher sedimentation rate compared to other sequences. The six-kilometer-thick Productive-Red Bed Formation was formed during the Early Pliocene, a period estimated at 1.8-2.2 million years according to a new chronostratigraphic scale. Numerous laterally extensive horizons are observed within the Productive-Red Bed Formation, which are undoubtedly associated with prolonged sedimentation hiatuses. Onlaps are observed in the northeastern di-

rection (Fig. 9B).

SS-8: Representing Aghjagil (Late Pliocene) sediments, SS-8 features medium- to high-amplitude, subparallel, continuous reflections (Fig. 10). Such reflection characteristics indicate uniform sediment accumulation and/or stable conditions at the relatively stable basin-floor.

This suggests that the sedimentation process occurred in relatively deep-water conditions, with these deposits interfacing with unconformity surfaces that bound SS-VIII both above and below, following a toplap and downlap -contacting pattern.

SS-9 and SS-10: These sequences represent Quaternary sediments. The boundary between the two sequences is consistently traced across all seis-

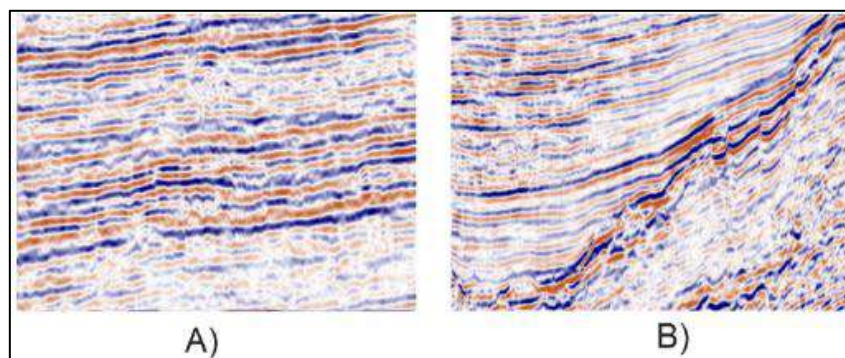


Fig. 9. A) Medium-to-high amplitude, parallel, and continuous reflections (seismic section “M”); B) onlaps (seismic section “E”) within Early Pliocene sediments

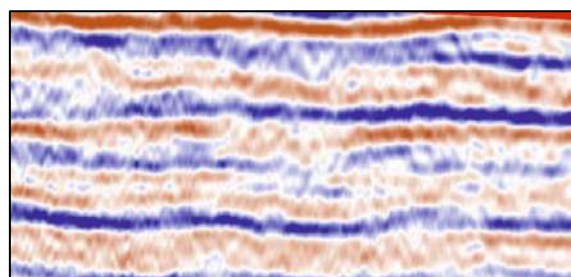


Fig. 10. High-amplitude, subparallel, continuous reflections (seismic section “L”) within Late Pliocene sediments

mic sections. Reflections are medium-to-high amplitude, parallel, and continuous, with notable sigmoidal, prograding clinoforms observed within SS-

10 (Fig. 11). Analysis suggests an increase in sediment accumulation rates and rising sea levels during sedimentation.

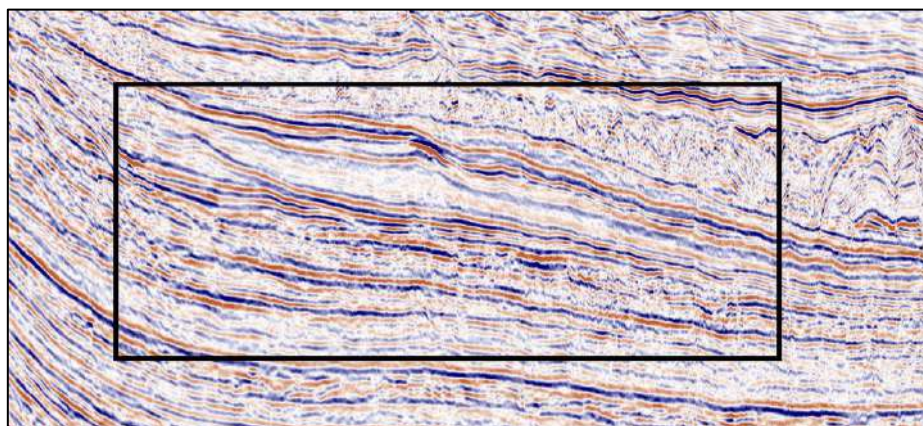


Fig. 11. Sigmoidal, prograding clinoforms (seismic section “C”) within Quaternary sediments

Conclusions. This study has provided valuable insights into geological structure of the transition zone between the South Caspian and Middle Caspian Basins, focusing on the region's tectonic evolution and its potential for oil and gas accumulation. The following conclusions can be drawn from the analysis of seismic data:

1. Tectonic and Sedimentary Evolution: The seismic sequences reveal a complex tectono-stratigraphic history for the region, characterized by significant changes in sedimentation patterns linked to both eustatic sea-level fluctuations and tectonic activities, including subduction processes. These

changes are reflected in the various seismic sequences identified, ranging from Jurassic to Quaternary deposits.

2. Identification of Key Geological Features: Several key geological features conducive to oil and gas accumulations were identified through seismic-stratigraphic analysis. These include onlap, top lap unconformities, clinoforms, and pinch-out zones, which suggest favorable conditions for the formation of hydrocarbon traps, particularly in sequences SS-3 (Upper Cretaceous), SS-5 (Maikop Series), and SS-7 (Productive Series).

3. Stratigraphic Division: The seismic stratigraphic

phic sequences identified in the study area show distinct variations in reflection characteristics, corresponding to different sedimentary environments and tectonic events. For instance, chaotic and discontinuous reflections in the Jurassic and Lower Cretaceous sequences (SS-1 and SS-2) contrast with the continuous, high-amplitude reflections in the Late Pliocene and Quaternary sequences (SS-8 and SS-10), indicating changes in depositional processes and sea-level variations.

4. Oil and Gas Exploration Potential: The analysis highlights several intervals with potential for hydrocarbon accumulation, particularly the Upper Cretaceous and Oligocene-Miocene sections, where tectonic activity has created favorable conditions for non-anticlinal traps. The identification of pinch-out zones, erosional truncations, and onlap unconformities in these sequences provides crucial information for future oil and gas exploration in the region.

References

1. Abdullayev N. A., Kadirov F., Guliyev I. S. (2015). *Subsidence history and basin-fill evolution in the South Caspian Basin from geophysical mapping, flexural backstripping, forward lithospheric modelling and gravity modelling*. Geological Society, London, Special Publications, 427, 175–196. DOI: <https://doi.org/10.1144/SP427.5>
2. Abdulla-zade M. Ch., Namazli N. E. (2024). *Seismogeological interpretation of the wave-reflecting horizons of the eastern side of the transition zone from the South Caspian to the Middle Caspian basin*. Stratigraphy, petroleum sedimentology, geochemistry, 1, 27–41. DOI: <https://doi.org/10.35714/ggistrat20240100008>
3. Adamia Sh. A., Lordkipanidze M. B., Zakariadze G. S. (1977). *Evolution of an active continental margin as exemplified by the Alpine history of the Caucasus*. Tectonophysics, 40, 183–199. DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(77\)90065-8](https://doi.org/10.1016/0040-1951(77)90065-8)
4. Akhmedov T. R., Namazli N. E. (2024). *Identification and analysis of the boundaries of depositional hiatuses using frequency filtering of seismic waves*. News of the Ural State Mining University, 4 (76), 26–33. DOI: <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2024-4-26-33>
5. Artyushkov E. V. (2007). *The formation of the South Caspian Depression as a result of phase transitions in the lower part of the continental crust*. Doklady Earth Sciences, 416 (5), 647–652. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1028334X07080016>
6. Berberian M., King G. C. P. (1981). *Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran*. Canadian Journal of Earth Science, 18, 210–265. DOI: <https://doi.org/10.1139/e81-019>
7. Brunet M. F., Korotaev M. V., Ershov A. V., Nikishin A. M. (2003). *The South Caspian Basin: a review of its evolution from subsidence modelling*. Sedimentary Geology, 156 (1–4), 119–148. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(02\)00285-3](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(02)00285-3)
8. Golonka J. (2004). *Plate tectonic evolution of the southern margin of Eurasia in the Mesozoic and Cenozoic*. Tectonophysics, 381, 235–273. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2002.06.004>
9. Green T., Abdullayev N., Hossack J., Riley G., Roberts A. (2009). *Sedimentation and subsidence in the South Caspian Basin, Azerbaijan*. Geological Society, London, Special Publications, 312, 241–260. DOI: <https://doi.org/10.1144/SP312.12>
10. Guliyev I. S., Mamedov P. Z., Feyzullayev A. A., Huseynov D. A., Kadirov F. A., Aliyeva E. H.-M., Tagiyev M. F. (2003). *Hydrocarbon systems of the South Caspian basin*. Nafta-Press, Baku, 206.
11. Huber H. (1978). *Geological map of Iran with explanatory notes (scale 1:1 000 000)*. Tehran: National Iranian Oil Company, Exploration and Production Affairs.
12. Kaz'min V. G., Verzhbitskii E. V. (2011). *Age and origin of the South Caspian Basin*. Oceanology, 51, 131–140. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0001437011010073>
13. Khalilov E. N., Mekhtiyev Sh. F., Khain V. E. (1987). *About some geophysical data confirming the collision origin of Greater Caucasus*. Geotektonika, 2, 54–60.
14. Knapp C. C., Knapp J. H., Connor J. A. (2004). *Crustal-scale structure of the South Caspian Basin revealed by deep seismic reflection profiling*. Marine and Petroleum Geology, 21, 1073–1081. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2003.04.002>
15. Korotaev M. V., Nikishin A. M., Ershov A. V., Brunet M. F. (2002). *South Caspian—modeling of tectonic history*. Tektonika i geofizika litosfery, 1, 263–265.
16. Jackson J., Priestley K., Allen M., Berberian M. (2002). *Active Tectonics of the South Caspian Basin*. Geophysical Journal International, 148 (2), 214–245. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2002.01588.x>
17. Mamedov P. Z., Salaev N. S. (1987). *Prospects for the search for non-anticlinal oil and gas deposits in the sediments of the Middle Pliocene of the northwestern part of the Absheron Archipelago*. Geologiya nefi i gaza, 4, 16–21.
18. Mamedov P. Z. (2006). *The peculiarities of the South Caspian Depression earth crust on the new geophysical data*. Azerbaijan National Academy of Sciences, Proceedings of the Sciences of Earth, 3, 36–49.
19. Mammadov P. Z., Namazli N. E., Mammadova L. P., Nasirova N. I. (2023). *Study of unconformity surfaces and discontinuities in the transition zone from the Middle Caspian Basin to the South Caspian Basin using seismostratigraphic analysis method*. ANAS Transactions, Earth Sciences, Special issue, 54–56. DOI: <https://doi.org/10.33677/ggianas-conf20230300013>
20. Mitchum R. M. Jr., Vail P. R., Thompson S. III. (1977). *Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part I: Overview*. In: C. E. Payton (ed.), In Seismic Stratigraphy—Applications to Hydrocarbon Exploration, 26, 5–52. Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, Memoir. DOI: <https://doi.org/10.1306/M26490C3>

21. Nalivkin V. (1968). *Geological map of the Caucasus (scale 1:500 000)*. M.
22. Philip, H., Cisternas, A., Gvishiani, A., Gorshkov, A. (1989). *The Caucasus: An actual example of the initial stages of continental collision*. *Tectonophysics*, 161, 1-21. DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(89\)90297-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(89)90297-7)
23. Sangree J. B., Widmier J. M. (1979). *Interpretation of depositional facies from seismic data*. *Geophysics*, 44, 131-160. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1440957>
24. Sengör A.M.C. (1990). *A new model for the late Paleozoic–Mesozoic tectonic evolution of Iran and implications for Oman*. In: A.H.F. Robertson, M.P. Searle, A.C. Ries (ed.), *The Geology and Tectonics of the Oman Region*, 49, 797–831. London: Geological Society, Special Publications. DOI: <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1992.049.01.49>
25. Sheriff R.E. (1980). *Seismic Sequence Analysis: The Geologic Models*. In: *Seismic Stratigraphy*, 45-67. Springer, Dordrecht. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-011-6395-8_3
26. Smith-Rouch, L.S., 2006, *Oligocene–Miocene Maykop/Diatom Total Petroleum System of the South Caspian Basin Province, Azerbaijan, Iran, and Turkmenistan*. U.S. Geological Survey Bulletin 2201-I, 27.
27. Vail P. R. (1987). *Seismic stratigraphy interpretation procedure*. In: A.W. Bally (ed.), *Atlas of seismic stratigraphy*, 1, 1-10. Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists.
28. Veeken P. C. H. (2007). *Seismic Stratigraphy, Basin Analysis and Reservoir Characterisation*. Amsterdam: Elsevier. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0016756808004329>
29. Zonenshain, L.P., Pichon, X. (1986). *Deep basins of the Black Sea and Caspian Sea as remnants of Mesozoic back-arc basins*. *Tectonophysics*, 123, 181-211. DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(86\)90197-6](https://doi.org/10.1016/0040-1951(86)90197-6)

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Геологічна інтерпретація хвильового поля у мезозойських і кайнозойських осадових комплексах перехідної зони між Південнокаспійським і Середньокаспійським басейнами методом сейсмостратиграфічного аналізу

Нурлан Намазлі ¹

аспірант, мол. наук. співробітник, ¹ Інститут геології та геофізики
Міністерства науки та освіти Республіки Азербайджан, Баку, Азербайджан;

Мурад Абдулла-заде ²

д. філософії, викладач,

² Азербайджанський державний університет нафти і промисловості, Баку, Азербайджан

Це дослідження вивчає тектонічну та осадову еволюцію перехідної зони між Південно-Каспійською та Середньокаспійською западинами. Дослідження має на меті проаналізувати сейсмостратиграфічні послідовності для покращення розуміння геологічної історії басейну, осадових процесів та вуглеводневого потенціалу. Воно також спрямоване на з'ясування структурних особливостей та тектонічних механізмів, відповідальних за формування та еволюцію цього складного геологічного регіону. У роботі застосовано метод сейсмостратиграфічного аналізу, зокрема аналіз сейсмічних послідовностей та сейсмічних фацій. Було виконано аналіз сейсмічних даних для ідентифікації осадових структур, стратиграфічних послідовностей і тектонічних особливостей. Сейсмічні розрізи, орієнтовані в напрямках північний захід-південний схід та північний схід-південний захід, були розділені на десять сейсмостратиграфічних послідовностей (SS-1 до SS-10). Ці послідовності були вивчені для визначення їхніх умов відкладення, тектонічних обстановок та характеристик відбиття. Аналіз сейсмічних фацій допоміг інтерпретувати умови відкладення та осадову динаміку в межах кожної послідовності, сприяючи ідентифікації структурних пасток та вуглеводневих резервуарів. Основні сейсмічні особливості: Було визначено такі особливості, як онлапи, топлапи, викинування, кліноформи та ерозійні зрізи, що вказують на сприятливі умови для накопичення вуглеводнів, особливо в SS-3 (верхня крейда), SS-5 (майкопська серія) і SS-7 (продуктивна товща). Тектонічна еволюція: Тектонічна еволюція регіону включає субдукцію, рифтинг і розвиток платформи. Ці геодинамічні процеси визначали умови осадонакопичення та структурні деформації. Закономірності сейсмічних відбиттів: сейсмічні відбиття вказують на значні варіації швидкості седиментації та умов відкладення. Наприклад, юрські та нижньокрейдові послідовності (SS-1 і SS-2) демонструють хаотичні та переривчасті відбиття, тоді як пізньопліоценові та четвертинні послідовності (SS-8 і SS-10) характеризуються безперервними високоамплітудними відбиттями, що свідчить про контрастні умови відкладення. Тектонічний вплив: Спостерігалися докази синседиментаційної тектоніки, включаючи деформацію, пов'язану з розломами, та седиментацію, спричинену опусканням, що підкреслює роль тектонічної активності у формуванні стратиграфії регіону та впливі на розподіл вуглеводнів.

Ключові слова: Південно-Каспійський басейн, Середньо-Каспійський басейн, сейсмостратиграфічний аналіз, відбиття, сейсмічні послідовності, сейсмофаціальний аналіз, сейсмічні розрізи, осади.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 17 лютого 2025 р.

Прийнята 2 квітня 2025 р.

Нові погляди на геологію Бачавсько-Боржавського субпокриву Дуклянсько-Чорногорського покриву

Мирослав Павлюк¹

академік НАНУ, д. г.-м. н., гол. наук. співробітник,

¹ Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН України, Львів, Україна;
e-mail: pavlyuk.myroslav@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0001-8741-0624>;

Володимир Шлапінський¹

к. геол. н., с. наук. співробітник,

e-mail: vlash.ukr@gmail.com,  <https://orcid.org/0009-0009-0403-8421>;

Олеся Савчак¹

к. геол. н., пров. наук. співробітник,

e-mail: savchakolesya@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0003-1491-7613>;

Мирослав Тернавський¹

провідний інженер,

e-mail: matrix5@ukr.net,  <https://orcid.org/0000-0003-3520-847X>

У статті розглянута ситуація, яка склалася у Бачавсько-Боржавському субпокриві Дуклянсько-Чорногорського покриву Закарпаття, у зв'язку з невизначеним раніше характером співвідношення між відкладами нижньокрейдової шипотської світи з бачавською піщаною товщею верхньокрейдового віку. Відсутня яловецька світа, яка мала би розміщуватись між ними. Її відсутність можна тлумачити присутністю локального розмиву або фаціальним заміщенням в цілому глинистої яловецької світи, піщаною бачавською світою. Докази, які дозволяють схилитись до ідеї про фаціальне заміщення, були отримані шляхом аналізу матеріалів геологічної зйомки минулих років. Вони полягають у відсутності ознак, які б свідчили про розмив яловецької товщі (базальних конгломератів, кутової незгоди). Таке заміщення простежене в одновікових відкладах в сусідньому Красношорсько-Говерлянському субпокриві, розташованому північніше. Там в басейнах річок Чорна Тиса (в районі смт. Ясіня) верхня частина малопотужної яловецької нерозчленованої світи заміщується піщаною чорногорською світою стратиграфічного діапазону верхня крейда (сенон). Літологічне заміщення строкатоколірних пачок на піщані відзначено і в басейнах річок Мала Шопурка, Середя Ріка та Косівська На окремих ділянках Буркутського покриву, розташованого південніше, зафіксоване майже повне заміщення глинистої яловецької світи піщаною буркутською світою верхньокрейдового віку. На сусідній з нами території Польщі у Сілезькій тектонічній одиниці строкатоколірна товща аналог нашої яловецької світи, літологічно заміщується одновіковими годувльськими пісковиками. Факт цього літологічного заміщення на ділянці Бачавсько-Боржавського субпокриву дозволив змінити попередню інтерпретацію його геологічної будови. У статті застосовано комплексний аналіз геологічних досліджень: літолого-фаціальний, палеонтологічний та структурно-тектонічні побудови.

Ключові слова: покриви, субпокриви, фліш, розмив, фаціальне заміщення, шипотські і бачавські верстви, Закарпаття.

Як цитувати: Павлюк Мирослав, Шлапінський Володимир, Савчак Олеся, Тернавський Мирослав (2025). Нові погляди на геологію Бачавсько-Боржавського субпокриву Дуклянсько-Чорногорського покриву. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (62), 104-111. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-08>

In cites: Pavlyuk Myroslav, Shlapinsky Volodymyr, Savchak Olesya, Ternavsky Myroslav (2025). New views on the geology of the Bachav-Borzhav subcover of the Duklyan-Monthern cover. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (62), 104-111. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-08> [in Ukrainian]

Вступ, постановка проблеми. Дуклянсько-Чорногорський покрив в українському сегменті Складчастих Карпат складається з шести субпокривів [7]. У північно-західній частині це наступні субпокриви, які насунуті одні на другі: Бачавсько-Боржавський, Полонинський, Березнянський та Ставнянський; у південно-східній Говерлянсько-Красношорський і Скупівський. У центральному секторі Бачавсько-Боржавський субпокрив насунутий на Говерлянсько-Красношорський. Отже, просторово останній може бути тотожним Полонинському або Березнянському субпокривам. Аналіз специфічних властивостей цих субпокривів, як на стадії осадонагромадження так пізніших подій почнемо з Бачавсько-Боржавського субпокриву Однойменна світа, яка надала назву

північно-західній частині субпокриву була виділена у 1967р. [3]. Бачавська світа складена масивними та грубоверстуватимипісковиками з пакетами ритмічного флішу. Пісковики (0,7-10 м) сірі і блакитно-сірі при вивітрюванні жовтувато-сірі та іржаво-жовті, дрібно- і різнозернисті щільні. Між піщані пакети складають дрібнозернисті пісковики та алевроліти (5-10 см), темно-сірі і блакитно-сірі аргіліти (5-15 см). Товщина таких пакетів досягає 3-5м. Характерною особливістю розрізу є наявність грубошаруватих пісковиків з закрученою шаруватістю та сферичною окремішністю. Товщина світи становить наближено 1500 м. Через знахідку Ж. С. Ковалем у пригирловій частині р. Люта амоніта *Euphylioceras sp.* та мікрофауни *Hormosina ovulum (Grz.) var. gigantea*

Geroch, Trochammina sp., Plectina sp., Plectorecurvoides alternans Noth., автори віднесли бачавську світу до верхньої крейди. Остання на їхню думку представляє собою стратиграфічний відповідник яловецької світи і нижньоберезнянської підсвіти.

Матеріали та методи досліджень. Обґрунтувати відсутність у Бачавсько-Боржавському субпокриві яловецької світи верхньої крейди через розмив або літолого-фаціальне заміщення. У статті застосовано комплексний аналіз геологічних досліджень на теренах поширення бачавської світи.

Основні результати досліджень. Бачавсько-Боржавський субпокрив є найпівденнішим з шести субпокривів Дуклянсько-Чорногорського покриву [7]. Він має поширення у північно-західній частині Українських Карпат. З півдня субпокрив обмежується насувом Буркутського і Магурського покривів. Він складається з двох частин Бачавської на північному заході і Боржавської на південному сході, які між собою не стикаються. Відстань між ними становить 20-25 км. Західніше Верхньогравовницького тектонічного піввікна вони роз'єднані структурами Березнянського субпокриву, на які насунута Бачавська ланка субпокриву. Східніше цього піввікна відклади Березнянського субпокриву перед фронтом Боржавського сегменту відсутні. Вірогідно, вони знаходяться під його насувом і на денній поверхні відсутні. Структурно Боржавський сегмент складається з двох протяжних лусок: Заньківської (зовнішньої) і Красноі Гранки. Вони (як і Бачавська одиниця) складені здебільшого піщаною товщею верхньої крейди-середнього еоцену [10, 11]. Заньківська луска в північно-східному напрямку на відрізку близько 50 км насунута на олігоценові відклади Бітлянсько-Свидовецького субпокриву Кросненського покриву, а в районі сс. Річки і Тюшки Міжгірського району на крейдово-еоценіві відклади Красношорського субпокриву Дуклянсько-Чорногорського покриву. Вздовж зовнішнього краю Заньківської луски серед піщаного флішу у її фронтальній частині по простяганню в чотирьох місцях виходять темноколірні відклади на геологічній карті зображені як замкнені контури (з північного заходу на південний схід): південніше с. Жденієво; в районі залізничної станції Занька у вигляді невеликого виходу на північному схилі г. Бозева. південніше смт. Воловець на північному схилі г. Плай; в розрізах потоків Плошанка і Пилипецькій біля с. Пилипець. Віддалі між ними становлять 6-8 км.

На виданій в УкрНДГРІ у 1977 р. геологічній карті Українських Карпат масштабу 1:200000 піщана товща віднесена до палеоцен-еоцену, а чорна товща до березнянської світи верхньої крей-

ди [5].

Дана чорна товща представлена чергуванням таких порід. Аргіліти чорні, темно-сірі і зеленувато-сірі некарбонатні нерідко кременисті (особливо чорні) з гострим сколом (0,1-0,5 до 1,0 м). Дрібнозернисті пісковики і алевроліти чорні і темно-сірі іноді кварцитовидні з поровим опаловим цементом або цементациєю розростання зерен, дуже щільні і міцні (до 0,1-0,2 м) іноді з тонкими жилками халцедону. Пісковики олігоміктові і поліміктові сірі і темно-сірі, різнозернисті або середньозернисті, некарбонатні або слабокарбонатні, кременисті щільні і міцні (0,5-1,2 м). Мергелі чорні кременисті з гострим ріжучим сколом, тонкоплитчасті (0,05-0,2 м). Складені з пелітоморфної глинисто-карбонатної маси з доволі рівномірною домішкою криптокристалічного кремнезему (до 20%). Аргіліти зелені некарбонатні (0,05-0,3 м) зустрічаються у верхній частині описаного розрізу. Зустрічаються тонкі прошарки кременистих вапняків і кременів (до 0,05 м). Вік цих верств визначений за знахідками комплексу форамініфер у зразках з верхньої частини розрізу товщі:

Ammodiscus eggeri Majz., Reophax minutus Tapp., Thalmannammina neocomiensis Geroch, Plectina grybowski Neagu., Trochammina imiatensis Tapp., Hipocrepina depressa Vas. За визначенням В.М. Заволянської вік товщі-вракон. Отже за літологічними ознаками і віком темноколірну товщу можна охарактеризувати як шипотську світу [10, 11]. Безпосередній контакт нерозчленованої піщаної товщі з відкладами шипотської світи, які залягають нижче, не встановлений. Товща складена здебільшого потужними пластами товстошаруватих пісковиків з прошарками аргілітів і алевролітів та пачками тонко- і середньоритмічного флішу. Пісковики поліміктові і олігоміктові сірі, блакитно-сірі і зеленувато-сірі різнозернисті з гравієм кварцитів, аргілітів, вапняків слюдистих, карбонатні і зрідка некарбонатні. Поряд з доволі щільними і міцними різновидами присутні й пористі різновиди середньої міцності, часто плитчасті, хвилястошаруваті і косоверстуваті з численними жилками кальциту (0,7-1,0 до 5-10 м). Пісковики дрібнозернисті і алевроліти сірі, темно-сірі іноді майже чорні, зеленувато-сірі, карбонатні і некарбонатні, середньо- і груборозслацьовані (0,03-0,5 м). Чорні аргіліти зустрічаються в нижній частині розрізу і дуже рідко у верхній. Поступово вверх збільшується вміст аргілітів зеленувато-сірих. В нижній і верхній частинах розрізу присутні прошарки мергелів і вапняків сірих і ясно-сірих міцних з жилками кальциту (0,04-0,2 м). Товщини пачок ритмічного чергування змінюється від 0,5-3,0 до 10-30 м. Вік порід з нижньої частини розрізу (за В. М. Заволянською) визначається за верхньокрейдовим комплексом мікро-

фауни: *Bogdanaviciella complanata* (Franke), *Dendrophya maxima* Friedb., *Hyperammina cylindrica cylindrica* (Glaessn.), *H. nova* Mjatl. В зразках sz середньої частини визначений також верхньокрейдовий комплекс форамініфер: *Silicobathysiphon gerochi* Mjatl., *Carpathiella ovulum gigantea* (Geroch.), *Bogdanaviciella complanata* (Franke), *Hyperammina nova* Mjatl. Товща згідно перекривається строкатоколірними відкладами верхнього еоцену. Потужність товщі від 1000 до 1500 м. Вважається, що піщана товща стратиграфічно згідно перекриває відклади шипоту [10, 11]. Яловецька світа (сеноман-коньяк), яка присутня у Дуклянсько-Чорногорському покриві між відкладами шипотської світи і сенонською ланкою розрізу верхньої крейди у Заньківській лусці не виявлена. Безпосередній перехід не спостерігається (не відслонений). Невідслонені ділянки становлять перші десятки метрів. Якщо припускати, що тут яловецька світа просто не відслонена (через розмив), то такі ділянки протяжністю, наприклад 40-50 м, явно не вкладаються в мінімальну товщину яловецької світи – 130 м. Отже, є всі підстави підозрювати, що контакт між описаними комплексами відкладів аномальний. Про це свідчить відсутність форамініфер сеноман-коньякського віку у відкладах піщаної товщі, натомість вона охарактеризована мікрофауною сенонського вікового інтервалу. Після встановлення факту аномального контакту між цими товщами, необхідно знайти його причини. Можливо, шипотські відклади знаходяться у тектонічних вікнах і відслонюються з під піщаної товщі? Проти цієї можливості промовляє знаходження шипотських “плям” у лобовій частині насуву Заньківської луски. Доводиться визнати, що вони є її складовою частиною, незважаючи на аномальний контакт з вищезалігаючими відкладами [18]. Це означає, що або мав місце розмив і тоді контакт аномальний або відбулось літологічне заміщення відкладів яловецької світи піщаною товщею з нормальним стратиграфічним контактом з шипотськими відкладами? Тим більше, що мікрофауна сенону походила не з самої нижньої ланки піщаної товщі. Припущення про локальний розмив видається неймовірним, адже такий розмив у цьому часовому інтервалі в Карпатах не зафіксований. Це так, проте могли існувати окремі мобільні ділянки басейну, де такі події могли відбуватись. Для прикладу можна зіслатись на зафіксовані явища розмиву і підводних зсувів масивів шипотських верств у верхняловецькій, чорногорській та тарнічорській відкладах верхньої крейди у сусідньому з Боржавським сегментом Бачавсько-Боржавського субпокрову Красношорсько-Говерлянському субпокрові. Там верхньокрейдова олісто-строма засвідчена на відрізку субпокрову

протяжністю у 80 км від р. Лазещини до р. Лужанки [17]. В басейні р. Лазещини і р. Чорної Тиси олістостромом з перевідкладеними породами шипотської світи і конгломератами з галькою гранітоїдів локалізована у середній і верхній частинах яловецької світи і в низах чорногорської світи (сенон-палеоцен). У 2017 р. В. Шлапінський в місті впадіння стр. Форесок в р. Лазещину відзначив не відслонений у 1983-1985 рр. 100-метровий суцільний добре видимий вихід відкладів нижньо-шипотської підсвіти, затиснутий між строкатими верствами яловецької світи (без сумніву олістоліт). В одновікових з чорногорськими відкладами тарнічорської світи Красношорського субпокрову в її низах Я. О. Кульчицький описав 100-метровий олістостромовий горизонт, складений гострокутними уламками (5-15 см), чорних аргілітів, сірих мергелів і чорних пісковиків шипотського типу, добре обкатаних уламків молочно-білого кварцу і метаморфічних порід Цементуючою є темноколірна глиниста маса [4]. За даними В. В. Кузовенка у відкладах яловецької світи Красношорського субпокрову у притоках рік Вільшанка і Лужанка (басейн Терембі) серед строкатих аргілітів яловецької світи, спостерігалась галька спілітів і брили діабазових порфіритів (діаметр до 4 м). За 35 км південно-східніше в правих притоках р. Середньої Ріки в нижній частині піщаної товщі верхньокрейдово-середньоеоценового віку за даними В. О. Ващенко зафіксовано гальку та брили діабазів [18, 19]. У двох невеликих притоках тієї ж ріки західніше г. Гребочель (1137,6 м) В. О. Агеевим описані у 1984 р. серед таких ж піщаних відкладів, глинистий фліш шипотської світи товщиною до 45 м. Ці приклади свідчать, що під час формування верхняловецьких та низів сенонських відкладів мали місце висхідні рухи, які супроводжувалися розмивом і зсувами шипотських верств і супроводжуючих їх вулканітів. Згадані на початку статті чотири ізольовані “плями” шипотських верств, серед піщаних верхньокрейдових відкладів, також можна було би вважати за олістоліти або олістоплаки, проте цьому суперечить їхнє положення в лобовій частині Заньківської луски. Тому не залишається іншого пояснення, як припущення, про локальний розмив яловецької світи або літологічне її заміщення, з подальшим нагромадженням піщаної верхньокрейдової товщі на шипотських верствах.

Скористаємось інформацією отриманою при розгляді Боржавського сегменту єдиного Бачавсько-Боржавського покриву та спробуємо використати її для аналізу стратиграфічних співвідношень в сегменті Бачавському. У ньому власне бачавські пісковики поширені у двох лусках: Бачавської і Петіговця (рис. 1А) [6]. На цій геологічній карті шипотські верстви відокремлені насувом

від бачавських пісковиків.

В. В. Даниш вбачав в шипотських верствах району с. Чорноголова луски видавлювання [2], тобто вважав їхній контакт бачавськими пісковиками тектонічним.

Про можливий розмив яловецької світи і безпосереднє залягання на шипотських верствах бачавських пісковиків вказувалось в роботах [4, 13, 14]. У 1975 р. в районі с. Чорноголова в смузі поширення бачавських пісковиків було завершено буріння параметричної свердловини 1-Чорноголова. Інтерпретуючи розкритий нею розріз О. С. Вялов зі співавторами вважали, що до глибини 2100 м вона проходила товщу бачавських пісковиків нормально залягаючих на темноколірному фліші (заломські верстви), які містять турон-коньякський комплекс мікрофауни [1]. Такої ж думки дотримувався С.С. Круглов, щоправда він вважав ці пісковики не бачавськими, а терешовськими Поркулецького покриву [9].

Контакти шипотської світи можна побачити в правих притоках р. Люта (струмок Стебний; його гирло навпроти р. Бачава) і в лівому розга-

луженні стр. Великий, що в селі Костева Пастіль. Отже в першій невеликій правій притоці стр. Стебний (рис. 1Б) на південній околиці с.Чорноголова в 200 м вище устя спостерігаються уламки пісковиків сильно кременистих майже кременів шипотської світи (за В.В. Кузовенком. Маршрут від 09.X. 1992 р.) [11]. У 330 м вище її устя в руслі корінний вихід тонкоритмічного чергування аргілітів (0,05-0,15 м) зеленувато-сірих з декількома прошарками аргілітів (до 0,2 м) чорних некарбонатних. Довжина-33 м. Вище без перерви пачка аргілітів червоних некарбонатних, товщиною 4 м. Впритул до пачки червоних аргілітів: чергування аргілітів (0,5-1,2 м) чорних і сірих з тонкими прошарками алевролітів і пісковиків сірих. На віддалі 150 м окремі виходи з перервами таких же порід з прошарками кременистих пісковиків. В кінці пісковики (0,2-0,6 м) сірі і сталеві-сірі, середньо- та різнозернисті, грубо- і нерівноплитчасті з пластами пісковиків (0,5-0,7 м) масивної текстурі; всі породи карбонатні. Мікрофауна відібрана з пачки червоних аргілітів в 1967 р. *Uvigerinammina jankoi* Majz (взірець з відсл. 954/1.

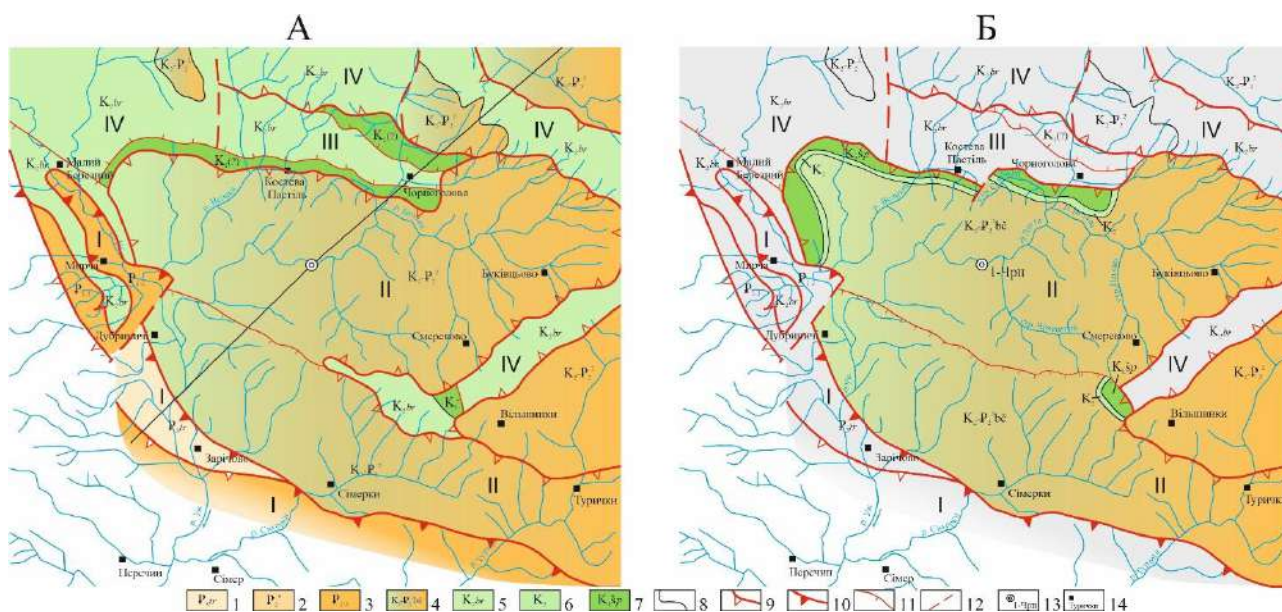


Рис. 1. Фрагмент геологічної карти району сс. Симерки-Чорноголова.

А – варіант карти 2007 р.; Б – змінений варіант тої ж карти, виконаний у 2025 р.

1–олігоцен. турицька світа; 2–еоцен нижній; 3–еоцен нижній-середній; 4–верхня крейда-еоцен середній, бачавська світа; 5–верхня крейда, березнянська світа; 6–верхня крейда (перехідна товща); 7–нижня крейда, шипотська світа; 8–геологічні границі стратиграфічно згідні;

насуви: 9–субпокривів, 10–покривів, 11–лусок; 12–скидо-зсуви; 13–параметрична свердловина 1-Чорноголова; 14–населені пункти.

Тектонічні елементи: I–Магурський покрив; Дуклянсько-Чорногорський покрив з субпокривами:

II–Бачавсько-Боржавський, III–Полонинський, IV–Березнянський /

Fig. 1. Fragment of the geological map of the area of the village of Symerki-Chornogolov.

A – version of the map of 2007; B – modified version of the same map, made in 2025. 1–Oligocene. Turyts'ka suite; 2–Lower Eocene; 3–Lower-Middle Eocene; 4–Upper Cretaceous-Middle Eocene, Bachava suite; 5–Upper Cretaceous, Berezhnya suite; 6–Upper Cretaceous (transitional layer); 7–Lower Cretaceous, Shipots'ka suite; 8–geological boundaries are stratigraphically consistent; thrusts: 9–sub-nave, 10–nave, 11–flakes; 12–slip-slips; 13–parametric well 1-Chornogolov; 14–settlements. Tectonic elements: I–Magursky nappe; Duklja-Chornohora nappe with subnappes:

II–Bachava-Borzhavskiy, III–Polonynskiy, IV–Berezhnyskiy

площі Люта). Пізніше з цього ж відслонення була відібрана мікрофауна у якій крім цього виду визначили додатково: *Plectina grzybowski Neagu.*, *Trochammina globigeriniformis (Parker et Jones)* *Plectorecurvoides alternans Noth.* [16], що визначає вік пачки червоних аргілітів, що відносяться до нижньоаяловецької підсвіти. Дослідники відзначили, що зустрінуті червоні аргіліти представляють собою лінзовидне утворення. Ці червоні аргіліти по простяганню ніде не відзначені Лише в наступній верхній правій притоці стр. Стебний зафіксовані дрібні уламки червоних аргілітів. У лівих притоках стр. Великий куди простягається смуга цих порід вони відсутні. І не дивно, тому що ці верстви відокремлені від їхнього північно-західного продовження поперечним скидо-зсувом (рис. 1Б). Характерно що зсув простежується по зміщенню границь смуги шипотських верств в зоні його простягання, з поділом їх на два блоки та по пониженнях в рельєфі тільки в межах шипотської товщі; вище в товщі бачавських пісковиків він не проглядається. Можливо, що зсув виник під час осадоагроадаження шипотських верств?

У самій верхній лівій притоці стр. Великий маршрутом пройшли В. В. Кузовенко і В. Є. Шлапінський (03.X.1992 р.). Вгорі за течією по потоку на віддалі 230 м з перервами відслонюються пісковики (0,15-0,5, зрідка 1,0 м). Вони середньо- та крупнозернисті, дрібнослюдисті, карбонатні та слабокарбонатні, деякі різновиди кременисті, масивної текстури і шаруваті, різної міцності.

Пісковики чергуються з аргілітами (0,1-0,4-1,2 м) сірими, темно-сірими, зеленувато-сірими та чорними не карбонатними, груборозшарованими, м'якими. Товщини таких пачок до 10 м. Загальна товщина цієї частини розрізу 150-180 м. Така товща відслонюється в усіх потоках, які перетинають дану смугу.

Нижче зафіксовано безпосередній контакт цієї перехідної товщі з породами шипотської світи. З ними контактує пачка чергування аргілітів (до 0,15 м) чорних кременистих, а також темно-сірих і зеленуватих (до 0,2 м) не карбонатних, з тонкими прошарками мергелів темно-сірих кременистих дуже міцних. Довжина виходу відкладів шипотської світи, причому літологічно ця товща подібна до нижньої її підсвіти – 150 м. Ніяких проявів розмиву на контакті не зафіксовано, наприклад наявності базальних конгломератів або кутової незгоди, як до речі і слідів тектонічних дислокацій.

Щодо контакту цієї товщі з породами нібито нижньошипотської підсвіти, то в Дуклянсько-Чорногорському покриві існують ділянки, де шипотську світу на підсвіти не можна розчленувати в силу літологічної одноманітності її розрізу [20]. У сусідній притоці (нижче по потоку) у від-

слоненні 2850 площі Великий Березний, представлено чергуванням описаних порід з перевагою пісковиків (до 1,3 м) знайдена мікрофауна верхньокрейдового віку [15]. Перехідна товща (відсл. 2851) між шипотською та бачавською світами літологічно нагадує відклади березнянської світи. Вище по потоку відсл. 2852, 2853 домінують вже пісковики бачавського типу (товщина пластів до 7 м). У першій невеликій правій притоці стр. Великий (урочище Осовець) відслонюються типові шипотські верстви, описані у відслоненнях 2561-2565 площі Великий Березний. Ширина смуги добре відслонених порід становить понад 400 м. Нижче по потоку виходять після незначної перерви, породи перехідної товщі, в яких визначена мікрофауна верхньої крейди (відсл. 2558 пл. Великий Березний). Простягання нижньо- та верхньокрейдових відкладів – захід – південний-захід добре узгоджується з поворотом на цій ділянці у цьому ж напрямку масиву бачавської товщі. Це свідчить про їхню структурну приналежність до неї.

Бачавська луска насунута на породи березнянської світи Полонинського та Березнянського субпокровів. Луска Петіговця в свою чергу насунута на Бачавську луску. Між ними у тектонічному піввікні знаходиться не дуже протяжна луска Знамин Полонинського субпокрову (рис. 1А). Вона складена породами березнянської світи з якими співвідносяться відклади шипотської світи [6]. Безпосередній контакт між ними не відзначений. У підосві шипотської світи у верхній течії лівого розгалуження стр. Чечоватого (права притока р. Люта) З. Ф. Жигунова описала конгломерати видимою товщиною 80 м [8]. Конгломерати складені кварцитами, кварцем та кварцево-слюдяними сланцями. Уламковий матеріал погано відсортований (галька та пласкі брили від декількох міліметрів до 0,4-0,5 м.). Цемент зеленувато-сірий кременисто-серицитовий. У правій притоці стр. Чечоватого в її верхній течії за даними В. В. Кузовенка (маршрут від 7.X. 1992 р.) відслонюються пісковики (0,5-1,5 м) темно-сірі та чорні, середньо- та різнозернисті карбонатні і сильнокарбонатні дуже міцні з гострим сколом, тріщинуваті. Після перерви у відслоненості (220 м) вихід пісковиків (до 0,5 м) зеленувато-сірих середньо- та різнозернистих, некарбонатних, тонкоплитчастих. На гребні між струмками Чечоватого правого та Пегового (права притока р. Люта, вище стр. Чечоватий) відслонюється пачка аргілітів червоних і зелених некарбонатних. Вище по схилу поширені пісковики бачавської світи. З опису цього маршруту можна скласти таку послідовність розрізу. У фронтальній частині луски Знамин виходять породи шипотської світи, вище від них перехідна товща типа березнянських (карбонатні

темно-сірі і чорні пісковики) верств, а ще вище бачавські пісковики з червоними і зеленими аргілітами у подошві. Щоправда, ці червоні аргіліти і аргіліти червоні з Бачавській лусці займають різне стратиграфічне положення. Складається враження, що тут спостерігається така сама послідовність порід як у фронтальній частині Бачавської луски. Тобто, тут присутнє не тектонічне піввікно, а фрагмент древнішої частини луски з шипотськими відкладами у передовій частині, який зберігся частково не зрізаний насумом на цій ділянці. Тобто, луска Знамин насправді представляє собою фронтальну частину луски Петіговця (рис. 2Б). Таким чином, спостерігається однотипна будова обох лусок (Бачавської та Петіговця) з шипотськими верствами у фронтальній частині. Південно-західніше з ними стратиграфічно нормально контактують перехідні верстви, подібні до березнянської світи з лінзами строкатих

аргілітів у подошві (фрагменти яловецької світи у Бачавській лусці), які нормально контактують з бачавськими пісковиками. До речі, у Боржавському сегменті субпокриву присутні дві луски Заньківської та Красної Гранки, яким в Бачавському відповідають відповідно луски Бачавська і Петіговця.

Висновки. Отже, більшість наведених фактів свідчать, що відсутність у Боржавському сегменті яловецької світи пояснюється фаціальним заміщенням її піщаним флішем, а у Бачавському вона тільки місцями присутня. Шипотська світа нижньої крейди стратиграфічно згідно контактує з перехідною товщею верхньої крейди. Факт цього заміщення і стратиграфічно нормального контакту шипотських і перехідних верств дозволив змінити попередню інтерпретацію геологічної будови Бачавсько-Боржавського субпокриву.

Список використаних джерел

1. Вялов О. С., Дабаган Н. В., Кульчицкий Я. О., Лозиняк П. Ю. (1978). Особенности строения южного склона Украинских Карпат по данным глубокого бурения в районе с. Черногорова (бассейн р. Уж). Геология и геохимия горючих ископаемых, 51, 3-6.
2. Даниш В. В. (1973). Геологія західної частини південного схилу Українських Карпат. К.: Наукова думка, 118.
3. Даныш В. В., Жигунова З. Ф., Полонский Б. Т. (1967). Геологический профиль через юго-западную часть Украинских Карпат (пересечение Турья Ремета–Полонина Ровная–Ужоский перевал). Вопросы геологии Карпат, 59-66.
4. Габинет М. П., Кульчицкий Я. О., Матковский О. И. (1967). Геология и полезные ископаемые Украинских Карпат, 1, 200.
5. Геологическая карта Украинских Карпат и прилегающих прогибов М-6 1:200000 (1977). глав. ред. В. А. Шакин. К.: Мингео УССР, УкрНИГРИ, 6 л.
6. Геологічна карта Українських Карпат. Закарпатська, Івано-Франківська, Львівська, Чернівецька області України. 1: 100 000 (2007). (Сост. В.В. Глушко, В.В. Кузовенко, В.Е.Шлапінський), редактор. Ю.З. Крупський, Отчет ЗАО Концерн Надра. Киев, 28.
7. Глушко В. В., Кузовенко В. В., Шлапінський В. Є. (1999). Нові погляди на геологічну будову північно-західної частини Дуклянського покриву Українських Карпат. Вісник Львів. ун-ту. Сер. геол. 13, 94–101.
8. Жигунова З. Ф., Коваль Ж. С., Петров В. Г. (1966). Отчет о поисково-съёмочных работах масштаба 1:25000, проведенных на площади Люта Закарпатской области УССР в 1964-1965 г.г. Трест "Львовнефтегазразведка", ЛГПК. Львов, 172.
9. Круглов С. С. (1977). Новые данные о структуре внутренних покровов флишевых Карпат. Обоснование направлений поисков нефти и газа в глубокозалегающих горизонтах Украинских Карпат. К.: Наукова думка, 49-53.
10. Кузовенко В. В., Жигунова З. Ф., Петров В. Г. (1977). Отчет о результатах групповой комплексной геологической съемки масштаба 1:50000, проведенной на площади Климец Львовской и Закарпатской областей УССР в 1973-1976 г.г. Трест "Львовнефтегазразведка", КГП. Львов, 185.
11. Кузовенко В. В., Жигунова З. Ф., Бунда В. А. (1982). Отчет о групповом геологическом доизучении и комплексной съемке масштаба 1:50000 на площади Вышков Ивано-Франковской и Закарпатской областей УССР в 1978-1982 г.г. (л. М-34-120-А, В; М-34-131-Б; М-34-132-А, В). Львов, 218.
12. Кузовенко В., Шлапінський В. (2007). До природи й умов розміщення "скель" неоконських діабазів у Буркутському покриві Українських Карпат. Праці НТШ. Геол. Збірник, IX, 40–49.
13. Лозыняк П. Ю. Дуклянская зона (1971). Геологическое строение и горючие ископаемые Украинских Карпат. Тр. УкрНИГРИ. 2, 132-137.
14. Лозыняк П. Ю. (1973). Меловые отложения и фауна радиоларий южного склона Украинских Карпат. Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. Львов, 23.
15. Некрасова Л. П., Даныш В. В., Барановский В. И. (1966). Отчет о поисково-съёмочных работах масштаба 1:25000, проведенных на площади Великий Березный Закарпатской области УССР в 1964-1965 г.г. 1, 213.
16. Полонский Б. Т., Жигунова З. Ф. (1968). Структурно-фациальные особенности Дуклянской зоны Украинских Карпат. Сов. Геология, 5, 108-112.

17. Шлапінський В. Є. (2009). Мікрофауна в олістостромових утвореннях верхньої крейди Говерляньського субпокриву в районі Ясині. *Збірник наук. праць ІГН НАН України. Викопна фауна і флора України: палеоекологічний та стратиграфічний аспекти*. Київ, 179-183.
18. Шлапінський В. Є., Павлюк М. І., Лазарук Я. Г., Савчак О. З., Тернавський М. М. (2023). До питання про стратиграфічну і структурну приналежність нижньокрейдових відкладів в Бачавсько-Боржавському субпокриві Дуклянсько-Чорногорського покриву (Закарпаття). *Проблеми прикладних геологічних наук і шляхи їх подолання*. Київ, Ін-т геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М. П. Семененка, 154-160.
19. Шлапінський В., Павлюк М., Савчак О., Тернавський М. (2024). Переінтерпретація геологічних щодо тектоніки окремих покривів і субпокривів Зовнішніх Карпат. *Геологія і геохімія горючих копалин*, 1–2 (193-194), 5–20. <https://doi.org/10.15407/ggcm2024.193-194.005>
20. Шлапінський В. Є., Лазарук Я. Г., Гавришків Г. Я., Попп І. Т. (2024). Літолого-стратиграфічні особливості нижньокрейдових відкладів Скибового і Дуклянсько-Чорногорського покривів Українських Карпат та перспективи їхньої нафтогазоносності. *Геологічний журнал*, 1, 62-80. doi: <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2024.1.283657>

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

New views on the geology of the Bachav-Borzhav subcover of the Duklyan-Monthern cover

Myroslav Pavlyuk¹

DSc (Geology), Leading Researcher,

¹ Institute of Geology & Geochemistry of Combustible Minerals of NASU, Lviv, Ukraine;

Volodymyr Shlapinsky¹

PhD (Geology), Senior Researcher;

Olesya Savchak¹

PhD (Geology), Leading Researcher;

Myroslav Ternavsky¹

Leading Engineer

ABSTRACT

Statement of the general problem. The article considers the situation that has developed in the Bachava-Borzhav sub-nave of the Duklja-Chornohora nappe, due to the previously undetermined nature of the relationship between the deposits of the Lower Cretaceous Shipotskaya suite with the Bachava sandy stratum of the Upper Cretaceous age.

Research materials and methods.

To substantiate the absence of the Upper Cretaceous Yalovets'ka suite in the Bachava-Borzhav subcap due to erosion or lithological-facies replacement. The article applies a comprehensive analysis of geological research in the areas of distribution of the Bachava suite.

Presentation of the mail research material. The article considers the situation that has developed in the Bachava-Borzhavsky sub-nave of the Duklja-Chornohorska nappe, due to the previously undetermined nature of the relationship between the deposits of the Lower Cretaceous Shipotskaya suite with the Bachava sandy stratum of the Upper Cretaceous age. The Yalovetskaya suite, which should be located between them, is absent. Its absence can be explained by the presence of local erosion or facial replacement of the clayey Yalovetskaya suite as a whole by the sandy Bachava suite. Evidence that allows us to lean towards the idea of facial replacement was obtained by analyzing materials from geological surveys of past years. They consist in the absence of signs that would indicate erosion of the Yalovetskaya stratum (basal conglomerates, angular unconformity). Such replacement has been traced in the same-age deposits in the neighboring Krasnoshora-Hoverla sub-nave, located to the north. There, in the basins of the Chorna Tysa rivers (in the area of the village of Yasyina), the upper part of the thin, undissected Yalovetsya suite is replaced by the sandy Montenegro suite of the Upper Cretaceous (Senonian) stratigraphic range. Lithological replacement of variegated units on sandstone is also noted in the basins of the Mala Shopurka, Sredya Rika and Kosivska rivers. In some areas of the Burkut cover, located further south, almost complete replacement of the clayey Yalovetsya suite by the sandy Burkutsya suite of the Upper Cretaceous age has been recorded. In the neighboring territory of Poland, in the Silesian tectonic unit, the variegated layer, an analogue of our Yalovetsya suite, is lithologically replaced by the same-age Godul sandstones. The fact of this lithological replacement also in the area of the Bachava-Borzhavka subcover allowed us to change the previous interpretation of its geological structure

Conclusions. Thus, most of the above facts indicate that the absence of the Yalovetskie suite in the Borzhavs segment is explained by its facial replacement by sandy flysch, and in the Bachavskie it is present only in places. The Shipotskie suite of the Lower Cretaceous stratigraphically contacts the transitional thickness of the Upper Cretaceous.

The fact of this replacement and the stratigraphically normal contact of the Shipotskie and transitional layers allowed us to change the previous interpretation of the geological structure of the Bachavskie-Borzhavskie sub-roof.

Keywords: *nappes, subnappes, flysch, erosion, facies replacement, Shipot and Bachava strata, Transcarpathia.*

References

1. Vyalov O. S., Dabagyan N. V., Kulchytskyi Ya. O., Lozyniak P. Yu. (1978). Features of the structure of the southern slope of the Ukrainian Carpathians according to deep drilling data in the area of the village Chernogolova (pool of the Uzh River). *Geology and geochemistry of combustible fossils*, 51, 3-6.
2. Danysh V. V. (1973). *Geology of the western part of the southern slope of the Ukrainian Carpathians*. K.: Naukova dumka, 118. [in Ukrainian]
3. Danysh V. V., Zhigunova Z. F., Polonsky B. T. (1967). Geological profile through the southwestern part of the Ukrainian Carpathians (intersection of Turya Remeta–Polonina Rovnaya–Uzhok Pass). *Voprosy geology of the Carpathians*, Lviv, 59-66.
4. Cabinet M. P., Kulchytskyi Ya. O., Matkovsky O. I. (1967). *Geology and minerals of the Ukrainian Carpathians*, I. 200.
5. Geological map of the Ukrainian Carpathians and adjacent depressions M-b 1:200000 (1977). (ed. chief. V. A. Shakin). K.: Ministry of Geology of the USSR, UkrNIGRY, 61.
6. Geological map of the Ukrainian Carpathians. Transcarpathian, Ivano-Frankivsk, Lviv, Chernivtsi regions of Ukraine. 1: 100 000 (2007). (comp. V.V. Glushko, V.V. Kuzovenko, V.E. Shlapinsky), editor: Yu.Z. Krupsky, Report of ZAO Concern Nadra. Kyiv, 28. [in Ukrainian]
7. Glushko V. V., Kuzovenko V. V., Shlapinsky V. E. (1999). New views on the geological structure of the northwestern part of the Duklja cover of the Ukrainian Carpathians. *Visnyk Lviv. Univ. Ser. geol. Issue 13*, 94–101. [in Ukrainian]
8. Zhigunova Z. F., Koval Zh. S., Petrov V. G. (1966). Report on search and survey work on a scale of 1:25,000, carried out on Lyuta Square in the Transcarpathian region of the Ukrainian SSR in 1964-1965. Trust "Lvivneftegazrazvedka", LHPK. Lviv, 172.
9. Kruglov S. WITH. (1977). New data on the structure of the internal cover of the flysch Carpathians. Rationale for directed exploration of oil and gas in the deep-lying horizons of the Ukrainian Carpathians. K.: Naukova dumka, 49-53.
10. Kuzovenko V. V., Zhigunova Z. F., Petrov V. G. (1977). Report on the results of a group complex geological survey on a scale of 1:50,000, conducted on Klymets Square in the Lviv and Transcarpathian regions of the Ukrainian SSR in 1973-1976. Trust "Lvivneftegazrazvedka", KGP. Lviv, 185.
11. Kuzovenko V. V., Zhigunova Z. F., Bunda V. AND. (1982). Report on the group geological survey and comprehensive survey of the scale 1:50000 in the Vyshkov square of the Ivano-Frankivsk and Transcarpathian regions of the Ukrainian SSR in 1978-1982. (I. M-34-120-A, B; M-34-131-B; M-34-132-A, B). Lviv, 218.
12. Kuzovenko V., Shlapinskyi V. (2007). On the nature and conditions of placement of the "rocks" of Neocomian diabases in the Burkut cover of the Ukrainian Carpathians. *Proceedings of the National Academy of Sciences. Geol. Collection*, IX. 40–49. [in Ukrainian]
13. Lozyniak P. Yu. Dukla zone (1971). Geological structure and combustible fossils of the Ukrainian Carpathians. *Tr. UkrNIHRY*. 2.132-137.
14. Lozyniak P. Yu. (1973). Cretaceous sediments and radiolarian fauna of the southern slope of the Ukrainian Carpathians. Autoref. diss. candidate geol.-min. of science Lviv, 23.
15. Nekrasova L. P., Danysh V. V., Baranovsky V. I. (1966). Report on search and survey works on a scale of 1:25000, carried out on the Velykyi Berezny area of the Transcarpathian region of the Ukrainian SSR in 1964-1965. 1, 213.
16. Polonsky B. T., Zhigunova Z. F. (1968). Structural and facies features of the Duklja zone of the Ukrainian Carpathians. *Sov. Geology*, 5, 108-112.
17. Shlapinsky V. E. (2009). Microfauna in the Upper Cretaceous olistostrome formations of the Hoverlyan sub-nave in the Yasyn region. *Collection of scientific works of the Institute of Geology of the National Academy of Sciences of Ukraine. Fossil fauna and flora of Ukraine: paleoecological and stratigraphic aspects*. Kyiv, 179-183. [in Ukrainian]
18. Shlapinsky V. E., Pavlyuk M. I., Lazaruk Ya. G., Savchak O. Z., Ternavsky M. M. (2023). On the question of the stratigraphic and structural affiliation of the Lower Cretaceous deposits in the Bachava-Borzhavsky sub-nave of the Duklja-Chornohora nappe (Transcarpathia). *Problems of applied geological sciences and ways of overcoming them*. Kyiv, M. P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation, 154-160. [in Ukrainian]
19. Shlapinsky V., Pavlyuk M., Savchak O., Ternavsky M. (2024). Reinterpretation of geological tectonics of individual covers and subcovers of the Outer Carpathians. *Geology and Geochemistry of Fossils*, 1–2 (193-194), 5-20. <https://doi.org/10.15407/ggcm2024.193-194.005>. [in Ukrainian]
20. Shlapinsky V. Ye., Lazaruk Ya. G., Gavrishkiv G. Ya., Popp I. T. (2024). Lithological and stratigraphic features of the Lower Cretaceous deposits of the Skybovy and Duklya-Chornohorsky covers of the Ukrainian Carpathians and the prospects of their oil and gas potential. *Geological Journal*, 1, 62-80. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2024.1.283657> [in Ukrainian]

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 25 March 2025

Accepted 30 April 2025

Міграція тритію у компонентах природного середовища

Олександр Пушкар'юв¹

д. геол. н., ст. наук. співробітник, пров. наук. співробітник,

¹ ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України», Київ, Україна,

e-mail: pushkarevigns@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4382-8620>;

Ірина Севрук¹,

к. геол. н., ст. дослідник, заст. директора,

e-mail: irina_mihalovna@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-2407-0735>;

Іван Шраменко¹

к. геол.-мін. н., ст. наук. співробітник, пров. наук. співробітник,

e-mail: shramenko_ivan@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-7010-0934>;

Олександр Зубко¹

наук. співробітник,

e-mail: zubko2019alex@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2521-8087>;

Володимир Вітер¹

к. хім. н., зав. лабораторії,

e-mail: chemanalyt555@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-2551-9495>

Тритій, утворений внаслідок природних чи техногенних процесів, включається в міграційні потоки в залежності від форм його знаходження – газової (НТ), водної (НТО) або органічно зв'язаної (ОЗТ). При атмосферному переносі зменшення концентрації тритію відбувається згідно законів дифузії у повітряних шлейфах. Частина тритію з атмосферними опадами потрапляє на поверхню водойм, де розбавляється до фонових концентрацій, на рослинність та ґрунт. Подальша геохімічна історія цих випадків визначається законами біогеохімічної та гідрогеохімічної міграції і включенням у короткостроковий і довгостроковий колообіг у біосфері. За результатами моніторингу вмісту тритію в сніговому покриві та в атмосферній вологості в зоні впливу пунктів збереження радіоактивних відходів (ПЗРВ) визначено, що формування атмогеохімічних аномалій тритію залежить від конструктивних особливостей конфайнменту, геоморфологічних та ландшафтно-геохімічних чинників (форм рельєфу, типу і структури лісової екосистеми), наявності технологічних приміщень, що відіграють роль природних та техногенних бар'єрів на шляху руху повітряних мас, а також від узагальненої за контрольний період рози вітрів. Біогеохімічна міграція тритію відбувається з водою атмосферних опадів в ґрунтово-рослинній системі. Тритій, як ізотоп водню, бере участь в усіх процесах біогеоміграції, що передусім визначається біологічною роллю води в органічній речовині. За результатами радіогідрогеологічного моніторингу територій, прилеглих до ПЗРВ, визначено головні фактори, що впливають на формування гідрогеофільтраційних потоків тритію в геологічному середовищі. До них відносяться: інтенсивність виходу тритійованої води зі сховищ радіоактивних відходів (РАВ), гідравлічна проникність, гідрофізичні параметри та мінеральний склад зони ненасиченої фільтрації, рельєф поверхні водотривкого горизонту та сезонні коливання надходження атмосферних опадів до місцевого водоносного горизонту. Довготривале функціонування гідрогеофільтраційних потоків тритію у системі «зона аерації (ЗА) – підземний водоносний горизонт (ПВГ)» обумовлює їх розповсюдження на відстані, що значно перевищують планові розміри емностей і територію ПЗРВ.

Ключові слова: тритій, форми знаходження тритію, природне середовище, атмогеоміграція, біогеоміграція, гідрогеоміграція.

Як цитувати: Пушкар'юв Олександр, Севрук Ірина, Шраменко Іван, Зубко Олександр, Вітер Володимир (2025). Міграція тритію у компонентах природного середовища. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (62), 112-126. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-09>

In cites: Pushkarov Oleksandr, Sevruck Iryna, Shramenko Ivan, Oleksandr Zubko, Volodymyr Viter (2025). Migration of tritium in the components of the natural environment. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (62), 112-126. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-09> [in Ukrainian]

Вступ. Геохімічна міграція елементів є комплексом фундаментальних природних процесів, що ведуть до просторового переміщення хімічних елементів, зі зміною їх концентрації в одній ділянці природного середовища та накопиченням або розсіюванням в інших. Міграція хімічних елементів відтворює суть геохімічних процесів, викликає переміщення атомів у просторі, приводить до зміни взаємозв'язків між ними та до зміни їх кількісних співвідношень і відбувається в різних середовищах – в рідких, газоподібних, рідше у

твердих системах. Геохімічна міграція елементів може відбуватися в атомній, іонній, молекулярній, колоїдній або грубо дисперсній формі, включає перехід хімічного елементу у структурний стан та форми знаходження, що забезпечують їх рухомість у даних зовнішніх умовах і є нерозривним комплексом процесів, які сприяють перерозподілу хімічних елементів у природних тілах. Стан міграції та її шляхи залежать від двох груп факторів:

– внутрішніх властивостей атому, переважно

© Пушкар'юв Олександр, Севрук Ірина, Шраменко Іван, Зубко Олександр, Вітер Володимир, 2025

від його наріжних електронів і, в меншій мірі, – від ядра;

– від зовнішніх термодинамічних умов, що обумовлюють міграцію у градієнтних полях компонентів природного середовища.

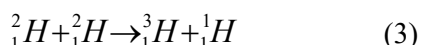
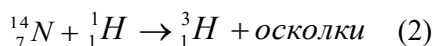
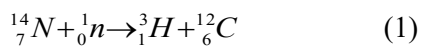
До внутрішніх факторів міграції відносяться їх гравітаційні, хімічні, електричні, радіоактивні властивості та група властивостей зв'язку (тобто швидкість дифузії, розчинність та ін.). Зовнішні фактори визначають стан середовища міграції та фізико-хімічні умови міграції.

Тритій, утворений внаслідок природних чи техногенних процесів, включається в міграційні потоки в залежності від форм його знаходження – газової (НТ), водної (НТО) або органічно зв'язаної (ОЗТ). Включаючись в різноманітні рухи атмосфери, поверхневих і підземних потоків, тритій поширюється в навколишньому середовищі згідно закономірностей колообігу водню в природі.

Метою роботи є систематизація та узагальнення інформації щодо процесів, які обумовлюють геохімічну міграцію радіоактивного ізотопу водню в природному середовищі.

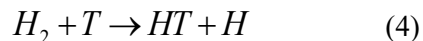
Атмогеохімічна міграція тритію. Атмосфера є важливим резервуаром і переносником радіонуклідів космічного і штучного походження. Тритій надходить в атмосферу двома шляхами – природним і техногенним. Ці два генетичних фактори є визначальними для подальшої геохімічної історії тритію в атмосфері.

Маса існуючої в даний час атмосфери зосереджена у стратифікованому шарі товщиною 100 км, який складається із тропосфери товщиною 16 км, стратосфери (до висоти 40 км), мезосфери (до висоти 80 км). Вище, розташований сильно іонізований шар – іоносфера, де внаслідок зіткнення високоенергетичних часток сонячного вітру (нейтронів ^1_0n , протонів ^1_1H , дейтронів ^2_1H) з молекулами повітря постійно утворюється тритій ^3_1H (Т) переважно у формі НТ [1]



Утворені під впливом космічного випромінювання атоми тритію мають високу кінетичну енергію і легко окиснюються киснем до утворення молекул НТО [2]. Цей процес обумовлюється ланцюговим перетворенням НТ в НТО за участі фотохімічних реакцій [1, 3]. Збуджені під впливом короткохвильового ультрафіолетового випромінювання молекули кисню швидко видаляють НТ з повітря. Атоми тритію, або утворені в ланцюгових фотохімічних реакціях радикали

TO_2^- , можуть реагувати з озоном (O_3) з утворенням радикала OT^- , який поєднується з воднем атмосфери, утворюючи НТО. Утворені внаслідок космічного випромінювання атоми тритію можуть неодноразово вільно зштовхуватися з атомами протію, що сприяє відновленню кількості молекул НТ згідно обмінних реакцій типу (4):



Невелика кількість НТО, що становить менше 1% від обсягів їх утворення за добу, також може бути отримана шляхом ініціювання реакції між тритієм і киснем внаслідок бета-випромінювання при розпаді тритію [4, 5]. Атмосферне окиснення космогенного НТ з утворенням НТО відбувається повільно з періодом трансформації понад 5 років [6].

Тритійована водяна пара з утворенням внаслідок трансформаційних реакцій співвідношенням НТ/НТО переноситься зі стратосфери в тропосферу з півперіодом в 1 рік. Низхідний рух в тропосфері та атмосферні опади є основними шляхами виведення тритію з атмосфери. Час перебування тритійованої пари в нижній тропосфері становить від 5 до 20 діб, після чого вона потрапляє на поверхню Землі у вигляді атмосферних опадів з подальшим включенням у гідрологічний цикл [2]. Біля 21% утвореної НТО випадає на рослинність, поверхню водойм та ґрунту, згодом частково випаровується і знову повертається в атмосферу.

Значна кількість тритію, що надходить в нижню частину атмосфери, розчиняється в світовому океані протягом року. Після осадження на поверхні океану у верхньому змішаному шарі тритійована вода розбавляється. В подальшому частка НТО випаровується назад в атмосферу із набагато меншою концентрацією тритію. Менша частина транспортується в глибини океану [7].

Надходження в стратосферу штучного тритію почалося після проведення серії термоядерних вибухів у 60–70-х роках минулого століття. За даними спеціальних станцій спостереження кількість техногенного тритію в атмосфері зростала включно до 1963 року [8, 9, 10].

До початку ядерних випробувань концентрація елементарного тритію в тропосфері ($\approx 3,7 \times 10^{-7}$ Бк $\times$ дм $^{-3}$) була, в середньому, на порядок нижче, ніж концентрація НТО, але внаслідок ядерних випробувань концентрація НТ зросла більш ніж на два порядки і утримувалась до 1975 р. на рівні $1,1 \times 10^{-4}$ Бк $\times$ дм $^{-3}$.

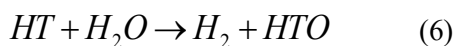
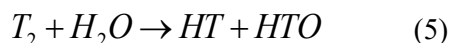
З поступовим зменшенням концентрації «бомбового» тритію лідерство у надходженні надважкого ізотопу водню в атмосферу перейшло до підприємств ядерного паливного енергетичного комплексу. Первинними джерелами

радіоактивних газо-аерозольних викидів з АЕС є вентиляційні системи приміщення першого контуру, самого реактора та приміщення, де розташовані басейни витримки високоактивного відпрацьованого ядерного палива (ВЯП).

Для легководних реакторів (PWR, ВВЕР і BWR) більша частина тритію, що виділяється в атмосферу, надходить від басейнів витримки ВЯП. Для важководних реакторів (HWR) домінуючим джерелом надходження тритію в атмосферу є важка вода теплоносія. Основними приміщеннями АЕС, де можливий інтенсивний обмін тритію між водою і повітрям, є басейни витримки відпрацьованого палива, випарні системи і апарати, хімічні лабораторії, системи обмивки обладнання.

В газо-аерозольних викидах з АЕС тритій існує у формі T_2 , НТ і НТО, рідше – тритієвого метану (CH_3T) [11]. Найбільшу частину в газо-аерозольних викидах складає пара тритійованої води (НТО) і тритійований газоподібний водень (НТ). Газова форма тритію недовговічна і на час її перетворення в НТО впливають температура повітря та вміст в ньому водяної пари.

Швидкість окиснення НТ до НТО пропорційна квадрату його концентрації у суміші та значною мірою залежить від наявності та кількості у повітрі водяної пари [12]. НТО утворюється при взаємодії тритію з водяною парою за реакціями обміну (5, 6):



Форма знаходження тритію важлива для його розподілу між компонентами навколишнього середовища. Газоподібний НТ реагує з іншими частинами навколишнього середовища повільніше, ніж НТО. Пара НТО поводить себе як звичайна вода в атмосфері і є більш поширеною хімічною формою у викидах з ядерних установок.

Тритій, що потрапив в атмосферу з вентиляційних та охолоджувальних систем, формує шлейфи підвищеної концентрації у повітрі. Його подальша атоміграція визначається закономір-

ностями аеродинаміки повітряних потоків та розсіювання домішок внаслідок дифузії. Атмосферні потоки тритію у формі НТ або пари НТО піддаються аналогічним дисперсійним процесам, як й інші типи атмосферних забруднень. Підйом шлейфу залежить від атмосферних умов і від характеристик джерела випуску.

Окрім типу викидів тритію, атмосферна дисперсія сформованих шлейфів залежить від багатьох факторів, пов'язаних з конкретними об'єктами, такими як кількість вентиляційних труб, висота вентиляційних труб, швидкість викиду, температура газу, що викидається, вологість повітря, розмір і розташування суміжних будівель, локальна атмосферна турбулентність і вітрові умови, а також місцева топографія.

Атмосферні умови значною мірою впливають на горизонтальну і вертикальну дисперсію шлейфу, яка є найбільшою в спокійних, ясних, денних умовах і найменшою – у спокійних, ясних, нічних умовах [13]. Кінцевим результатом математичного моделювання атмосферної дифузії є Гаусова модель розподілу домішок у хмарі викиду, яка в значній мірі ґрунтується на роботі Пасквілла [14]. Розрахунок швидкості поширення та дисперсії домішок у шлейфі для розподілу Гаусса залежить від оцінки стабільності атмосфери.

Дисперсія вмісту домішок у шлейфі визначається як фактор розбавлення. Розрахунок його значень виконується з урахуванням таких параметрів, як строковість викидів, точкове чи поширене джерело викиду, категорія стабільності або стійкості атмосфери, повторюваність напрямку вітру за час викиду тритію з джерела та його об'ємної активності у повітрі над однорідним поверхневим джерелом, переважання рози вітрів у заданому напрямку, відстань розрахункової позиції від джерела викиду та товщина шару перемішування тощо.

Для безперервного викиду з піднесеного точкового джерела при постійних параметрах вітру, його швидкості та інших атмосферних умов модель Гаусова шлейфу може бути розрахована згідно виразу (7) [8]:

$$C_A(x, y, z) = \frac{Q_i}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (7)$$

де: $C_A(x, y, z)$ – концентрація тритію у повітрі в точці (x, y, z) у напрямку вітру, $Bк \times м^{-3}$; x – відстань за вітром, м; y – бічний розмір шлейфу, м; z – вертикальний розмір шлейфу, м; Q_i – швидкість викиду радіонукліда, $Bк/с$; σ_y , σ_z – параметри дифузії, які є функцією відстані x у напрямку вітру і стабільності атмосфери, м; u – середня швидкість вітру, $м \times с^{-1}$; H – висота точки викиду, м.

Значення H являє собою фізичну висоту точ-

ки вивільнення з вентиляційної споруди плюс надбавка за будь-який додатковий підйом шлейфу за рахунок імпульсу (вихлопи вентилятора і т. ін.). У більшості випадків, пов'язаних з викидом радіонуклідів, ефективна висота точки викиду відповідає фізичній висоті вентиляційної споруди. Коефіцієнти горизонтальної та вертикальної дисперсії концентрації тритію в шлейфі розраховують з використанням формули Сміта – Хоскера [8].

Можливим джерелом надходження тритію в атмосферу є пункти збереження радіоактивних відходів (ПЗРВ). Згідно нашим спостереженням на таких об'єктах вихід тритію в навколишнє середовище із сховищ може здійснюватися двома шляхами – еманаціями газо-аерозольної суміші крізь перекриття сховищ, або інфільтраційним шляхом у вигляді тритійованої води (НТО) крізь порушення суцільності інженерних бар'єрів – стінки і днища сховищ [15].

Першим шляхом формуються атморадіогеохімічні аномалії, подальше існування та розвиток яких визначається метеорологічними факторами – переважним напрямком і силою руху повітряних мас, типом й інтенсивністю атмосферних опадів, а також впливом інших природних та техногенних чинників. Прямими вимірами концентрації тритію в атмосферній волозі за межами конфайнмента, спорудженого над сховищами РАВ,

було показано, що атмоміграція тритію у стабільному стані повітря відбувається, головним чином, дифузійним шляхом з поступовим розбавленням в межах ізометричного шлейфу [16] (рис. 1). Розміри сформованої у цей час атмогеохімічної аномалії в контурі $10 \text{ Бк} \times \text{м}^{-3}$ дорівнювали у північному напрямку 180 м від основного джерела виток тритію і 110 м – в південному напрямку. В широтному напрямку розміри аномалії не перевищували 250 м.

Вилучення тритію з атмосферного повітря в зимовий період визначається можливістю його екстракції частинками снігу та льоду. Осадження тритію в сніговий покрив відбувається шляхом прямого обміну між парою НТО та снігом і відповідає його концентрації в середовищі формування опадів. Так, згідно Девісу і Баррі, швидкість перенесення тритію в сніговий покрив складає біля $(1,6 \div 3,0) \times 10^{-3} \text{ м} \times \text{с}^{-1}$ [17, 18].

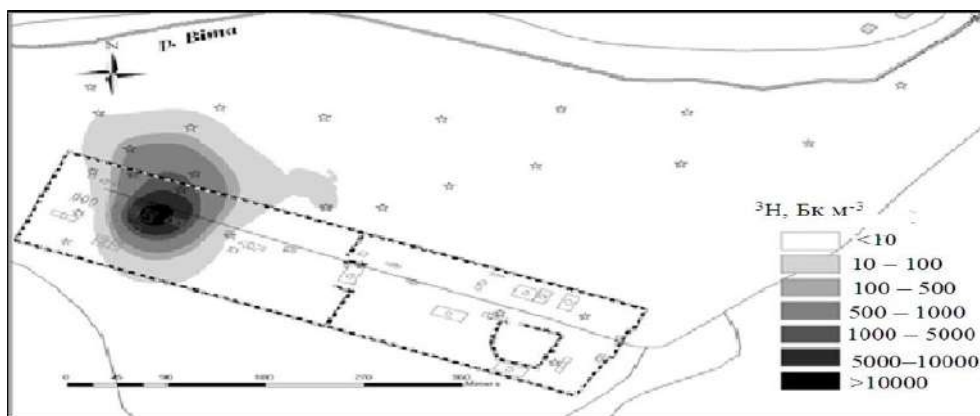


Рис. 1. Поширення тритієвої атмогеохімічної аномалії в санітарно-захисній зоні Київського ПЗРВ заданими атмосферних вимірювань. Зірочками позначено точки відбору проб повітря [16] /

Fig. 1. Distribution of tritium atmochemochemical anomaly in the Kyiv SFRW according to the data of atmospheric measurements. Air sampling points are marked with asterisks [16]

Процес обміну тритієм між парою НТО і снігом був зафіксований в межах проммайданчика та санітарно-захисної зони (СЗЗ) Київського ПЗРВ. Внаслідок самочинної вентиляції відбувалося виносення тритію атмосферними потоками через вентиляційні отвори конфайнменту, розташовані на висоті близько 3 м. В умовах невеликих від'ємних температур та високої вологості повітря волога конденсувалася у приземному шарі атмосфери та осідала на поверхню снігу (рис. 2). Як наслідок, вміст тритію у сніговому покриві збільшився від $4\text{--}8 \text{ Бк} \times \text{дм}^{-3}$ (під час опадів) до $100 \div 3\,000 \text{ Бк} \times \text{дм}^{-3}$ (після 30-добової експозиції в умовах стійкого снігового покриву).

На основі узагальнення отриманих результатів моніторингу вмісту тритію в сніговому покриві та прямих вимірів тритію в атмосферній волозі було встановлено, що поширення тритію з атмосферними потоками лише частково залежить від узагальненої за контрольний період рози

вітрів. Більш значущими чинниками впливу на інтенсивність і напрямок переносу тритію у приземній частині атмосфери є особливості рельєфу, наявність природних і техногенних бар'єрів, які обумовлюють переважний рух повітряних мас.

Подальша геохімічна історія тритію, що переноситься атмосферними потоками, визначається процесами його вилучення з повітря, осадження на рослинність, поверхню водойм та ґрунту та включення у короткостроковий і довгостроковий колообіг у біосфері.

Біогеоміграція тритію. Тритій, як ізотоп водню, бере участь в усіх процесах біогеоміграції, що передусім визначається біологічною роллю води в органічній речовині. Включення в ці процеси важких ізотопів водню відбувається надзвичайно швидко внаслідок ізотопного обміну, окиснення до водної форми, фракціонування в процесах фотосинтезу, кореневого живлення та інших біогеохімічних процесів. Основними шляхами

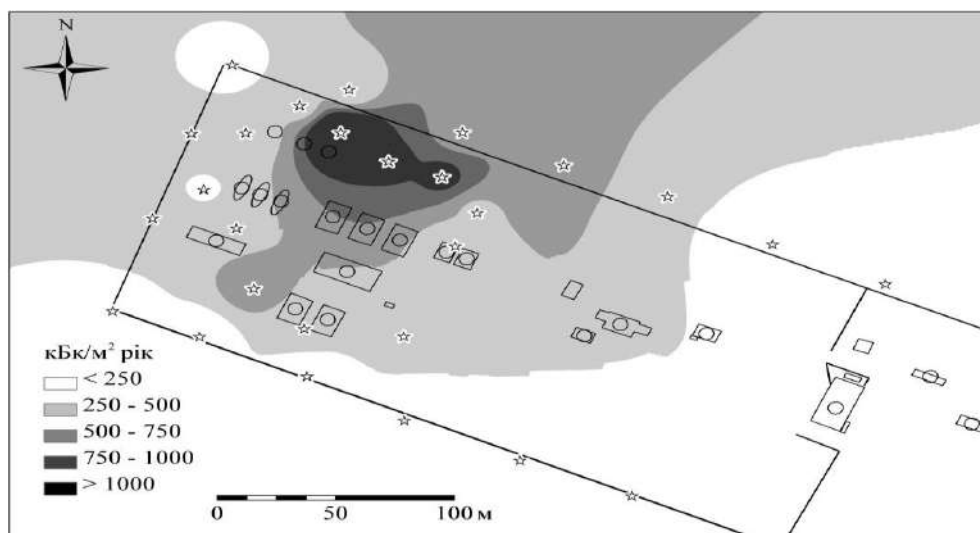


Рис. 2. Розподіл тритію у сніговому покриві внаслідок його емісії зі сховищ Київського ПЗРВ та атмосферної міграції [16] /

Fig. 2. Distribution of tritium in the snow cover due to its emission from Kyiv SFRW and atmospheric migration [16]

надходження тритію в рослини є засвоєння водної та парової фаз НТО, що переносяться при атмогеохімічній міграції та вимиваються з повітря атмосферними опадами.

Основні біофізичні процеси, що визначають біогеоміграцію тритію:

- початкове осаджування на поверхню ґрунту і рослинність;
- перетворення НТ в НТО в ґрунті через бактеріальне окиснення;
- поглинання НТО рослинами з перетворенням частини НТО в ОЗТ;
- транспортування НТО в ґрунті та поглинання НТО корінням;
- реемісія НТО в атмосферу з ґрунту і рослин.

Перенос тритію в системі «атмосфера – рослинність – ґрунт» відбувається в три фази. Перша фаза – це період осадження, коли хмара, що вміщує НТО, проходить над територією, а концентрація в атмосфері є рушійною силою поглинання тритію. Друга фаза – це транспірація НТО з рослинності в атмосферу, яка відбувається через продиhi і кутикули та залежить від температури, вологості, сили і напрямку вітру, інтенсивності світла.

Перша і друга фази переносу тритію в системі «атмосфера – рослинність – ґрунт» відбуваються швидко відразу після надходження тритію з атмосфери. Вони чутливі до існуючих метеорологічних параметрів (сонячного світла, вологості, температури і кількості опадів), а також фізіології та стадії росту рослин.

Третя фаза починається через кілька днів після того, як відбулося осадження тритію з атмосфери, коли рушійною силою стає транспірація тритійованої води. Транспірація води рослинами призводить до її пересування по ксилемі з коріння в листя. Рослина транспірує, коли вологість нав-

колишнього повітря нижче, ніж вологість повітря в порах рослинної тканини. В інших умовах рослина буде продовжувати поглинати водяну пару з повітря з утворенням ОЗТ. Зв'язок між вологістю ґрунту і евапо-транспірацією відповідає за реемісію тритію в атмосферу й має вирішальне значення для біогеохімічної міграції тритію в біосфері.

В узагальненому вигляді надходження НТО з атмосфери в листя (без врахування частки тритію, що поглинається в формі ОЗТ) як результат взаємодії цих різноспрямованих процесів може бути відображено рівнянням (8) [19]:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\gamma V_{exc}}{M_w} \left(C_{air} - \frac{\rho_s C_s}{\beta} \right) + \frac{V_{exc}}{M_w} (\rho_s - \rho) C_s \quad (8)$$

де: C – концентрація НТО у вільній воді рослин (головним чином вода у листі), $\text{Бк} \times \text{кг}^{-1}$; C_{air} – концентрація НТО у повітрі, $\text{Бк} \times \text{м}^{-3}$; C_s – концентрація НТО у випарах (транспіраційній воді), в результаті екстракції води коріннями на різній глибині, $\text{Бк} \times \text{кг}^{-1}$; ρ_s – абсолютна вологість повітря при температурі рослинності, $\text{кг} \times \text{м}^{-3}$; ρ – вологість повітря на відповідній висоті, $\text{кг} \times \text{м}^{-3}$; V_{exc} – швидкість обміну між атмосферою і рослинним покривом, $\text{м} \times \text{с}^{-1}$; M_w – маса мобільної вологи в листі, віднесена на одиницю поверхні ґрунту, $\text{кг} \times \text{м}^{-2}$; γ – відношення швидкості обміну НТО $\rightarrow \text{H}_2\text{O}$ до швидкості обміну води (зазвичай = 0,95); β – ізотопне фракціонування між тритієм і воднем (усереднений показник 1,1).

Частина тритію, яка внаслідок дифузії та транспортування водою надійшла в рослинність у вигляді НТО, внаслідок фотосинтезу перетворюється у вуглеводи (ОЗТ). Утворений у листі ОЗТ

переноситься до коріння де локалізуються продукти фотосинтезу. Там ОЗТ затримується або розкладається з утворенням НТО внаслідок автотрофних кореневих трансформацій чи гетеротрофних трансформацій при мікробному розкладанні біо-косної речовини (грунтового вуглецю та підстилки). Тритій, затриманий в ґрунті або в органічно зв'язаній формі, виключається з колообігу в біосфері.

Внаслідок атмосферної емісії тритію, обумовленої конвективно-дифузійним виходом газо-аерозольної суміші зі сховищ РАВ, в зоні розміщення ПЗРВ Київського Державного міжобласного спецкомбінату (КДМСК) «РАДОН» утворилась радіобіогеохімічна аномалія водню в однорічній і багаторічній рослинності. Більш високі концентрації тритію в межах промайданчика ПЗРВ були зафіксовані в місцях, наближених до сховищ РАВ, і значно меншими – в іншій частині санітарно-захисної зони [15].

Співвідношення питомої активності тритію у транспіраційній (ТВ) та органічно зв'язаній (ОЗТ) формах визначено як коефіцієнти пропорційності, обчислені за виразами (9, 10, 11, 12):

$$Kr^1 = A_G^{2F} / A_G^{1F} \quad (9)$$

$$Kr^2 = A_L^{2F} / A_L^{1F} \quad (10)$$

$$Kr^3 = A_L^{1F} / A_G^{1F} \quad (11)$$

$$Kr^4 = A_L^{2F} / A_G^{2F} \quad (12)$$

де: A_G^{1F} – питома активність тритію в ТВ трави (1 фракція); A_G^{2F} – питома активність тритію в ОЗТ трави (2 фракція); A_L^{1F} – питома активність тритію в ТВ листя (1 фракція); A_L^{2F} – питома

активність тритію в ОЗТ листя (2 фракція).

Осереднені значення питомої активності тритію та співвідношень його вмісту в різних формах знаходження в рослинності промайданчика ПЗРВ та його СЗЗ наведено в таблиці 1. Довготривале існування атмогеохімічного міграційного потоку обумовило узгоджений процес накопичення тритію у транспіраційній воді (ТВ, температура вилучення фракції НТО до 150 °С) і в ОЗТ ($t = 240-650$ °С) у травостої (однорічна рослинність) та в листі дерев та кущів (багаторічна рослинність). Це підтверджується коефіцієнтами кореляції між динамікою поглинання ТВ та накопичення тритію з атмосфери ОЗТ в однорічній та багаторічній рослинності в зоні впливу ПЗРВ, які коливаються від 0,89 до 0,98 (див. табл. 1).

Зазначимо, що більш ефективно, ніж однорічна рослинність (трава), тритій поглинається й утримується багаторічною рослинністю – кущами та деревами (відповідно $Kr^2 = 1,44$, $Kr^4 = 1,19$ (табл. 2). Вільно мігруюча вода внаслідок більшої мобільності та більшої залежності від змін питомої активності тритію в атмосферному шлейфі і насиченості вологою повітря, має меншу питому активність тритію, ніж органічно фіксована (відповідно $Kr^1 = 1,17$, $Kr^3 = 0,96$). За час емісії тритію зі сховищ РАВ відбулося суттєве накопичення важкого ізотопу водню в органічно зв'язаній формі. Відповідно, значна частина поглинутого рослинністю з повітря тритію затримується на час існування органічної речовини і надійно виключається з біологічного колообігу.

Таблиця 1 / Table 1

Питома активність тритію в різних формах знаходження в рослинності промайданчика ПЗРВ та його СЗЗ /

Specific activity of tritium in various forms in the vegetation of the industrial site of the SFRW and its SPZ

Питома активність тритію Бк*см ³ (середнє)		Трава		Листя	
		ТВ	ОЗТ	ТВ	ОЗТ
		685	800	659	952
Коефіцієнти кореляції між вмістом тритію у різних фракціях вологи	Cor.(fr)		0,98		0,89
	Cor.(g/l)			0,98	0,95

Примітка. Коефіцієнти кореляції: Cor.(fr), обчислені для фракцій вологи у кожному типі рослинності; Cor.(g/l) – між травою і листям по кожній із фракцій.

Таблиця 2 / Table 2

Співвідношення питомої активності тритію у транспіраційній (ТВ) та органічно зв'язаній (ОЗТ) формах знаходження (коефіцієнти пропорційності) у рослинності промайданчика ПЗРВ та його СЗЗ /
The ratio of the specific activity of tritium in transpiration (TW) and organically bound (OBT) forms of occurrence (proportionality coefficients) in the vegetation of the industrial site SFRW and its SPZ

Форми знаходження тритію	трава	листя	ТВ	ОЗТ
Коефіцієнти пропорційності	Kr^1	Kr^2	Kr^3	Kr^4
	1,17	1,44	0,96	1,19

Примітка. Kr^n – коефіцієнти пропорційності, $n = 1, 2, 3, 4$.

Дані щодо вмісту тритію в однорічній і багаторічній рослинності дозволяють визначати просторове положення атмогеоміграційних шляхів розповсюдження тритію. Рослинні індикатори опосередковано відображають вплив цього міграційного потоку на пряме поглинання тритію органічною речовиною з повітря, або ж всмоктування його із кореневого шару ґрунту, куди важкий ізотоп водню надходить з атмосферними опадами [16]. Окрім того, результати виміру вмісту тритію в рослинах дозволяють оцінити біогеохімічні іммобілізаційні властивості фітоценозу. Враховуючи осереднені дані про біологічну продуктивність трави та листя дерев, що відповідають умовам місця розташування ПЗРВ Київського ДМСК, розраховано питомі запаси тритію, які поглинаються рослинністю (табл. 3) на одиничному майданчику площею 1 м². Розрахунок виконано на основі даних про вагу проаналізованої наважки рослинної біомаси, об'єм отриманої з неї витяжки вологи, питому активність тритію в цій витяжці та осереднену річну продуктивність рослинної біомаси на 1 м² площі за виразом (13):

$$Z = A \times V \times B \times P^{-1} \quad (13)$$

де: Z – запас тритію в біомасі, Бк; A – питома активність тритію, Бк×см⁻³; V – об'єм отриманої витяжки вологи, см⁻³; B – осереднена річна продуктивність рослинної біомаси, г×м⁻²; P – вага проаналізованої наважки, г.

Таким чином, тритій, що викидається в повітря, поглинається однорічною та багаторічною рослинністю. При цьому тритій захоплюється органічною біомасою у вигляді вільно мігруючої води (ТВ), яка значною мірою внаслідок транспірації випаровується назад у повітря з трави та листя, та в міцно пов'язаній формі рослинної целюлози. І перша, і друга форми вилучають тритій з водневого колообігу, але перша форма – лише на період вегетаційного процесу з частковим поверненням у повітря за рахунок транспірації та після опадання і наступного розкладання листя і трави. У другій формі тритій фіксується на час існування рослинної целюлози. При цьому, коефіцієнти кореляції між динамікою поглинання та утримання тритію в різних типах рослинності дорівнюють 0,89–0,98 (див. табл. 2).

Таблиця 3/ Table 3

Запас тритію, що накопичується рослинністю з одиничної площі земної поверхні в зоні впливу ПЗРВ Київського ДМСК / Tritium stock accumulated by vegetation from a unit area of the earth's surface in the area of influence of the SFRW Kyiv SISC

Запас тритію, Бк×м ⁻²			
ТВ		ОЗТ	
Трава	Листя	Трава	Листя
92	141	114	205

Ступінь поглинання тритію рослинною біомасою залежить від інтенсивності її накопичення і є показником біогеохімічних бар'єрних властивостей фітоценозу. Цей параметр в опосередкованому вигляді враховує взаємодію різних факторів, таких як концентрація тритію в атмосферних опадах та їх кількість, ступінь накопичення тритію на поверхні ґрунту та в його кореновому шарі тощо. Враховуючи таку властивість рослинності, міграційні потоки тритію в приземному повітрі можуть бути зафіксовані при застосуванні біогеохімічного опробування. Цей метод дуже детально опрацьовано в пошуковій геохімії. За його допомогою на потенційно аварійних об'єктах (якими є ПЗРВ, побудовані на початку 60-х років) може бути заздалегідь визначено переважаючі напрямки атмосферних потоків, за якими буде здійснюватися повітряна міграція тритію в разі виникнення аварійних викидів.

На об'єктах, де концентрований вихід тритію в атмосферу вже відбувається, таким чином може бути встановлено ареал розповсюдження забрудненої тритієм рослинності з відображенням на

біогеохімічній карті градацій вмісту нукліду та визначено найбільш небезпечний напрямок радіаційного забруднення території шляхом повітряного переносу. За даними біогеохімічного картування території СЗЗ та враховуючи дані про приріст рослинної біомаси можна оцінити частку тритію, що вилучається з водневого колообігу та виключається з трофічних ланцюгів.

Гідрогеоміграція тритію. Близько 99% від загальної кількості природного тритію, що бере участь в глобальному коловороті води, потрапляє на земну поверхню у вигляді тритійованої води (НТО). Частка тритію, що знаходиться в атмосфері у вигляді молекул НТ, окиснюється до НТО і разом з іншими молекулами НТО включається в загальний колообіг тритію в біосфері. Згідно існуючих оцінок, у глобальному балансі природного тритію головним депо є гідросфера [20]. При цьому, у світовому океані розчинено біля 65%, в т.ч. 35% у верхніх і 30% у глибинних шарах океанів. Залишкові 27% і 7% розподілені між суходолом і атмосферою.

Швидкість включення тритію в гідрологічний цикл визначається швидкістю й особливостями

ми його надходження на земну поверхню, поверхневого змиву, інфільтрації та зворотного випарювання.

Міграція тритію у світовому океані. Тритій, що надходить у нижні шари атмосфери, розчиняється в океані протягом року завдяки паро-обмінним процесам і внаслідок цих же обмінних процесів частково випаровується в атмосферу при набагато меншій концентрації НТО [21]. До початку ядерних випробувань концентрація тритію в поверхневих водах океану становила близько $0,12 \text{ Бк} \times \text{дм}^{-3}$ [7]. З початком ядерної ери розподіл тритію у світовому океані визначався динамікою глобальних випадіння і спрямованістю та потужністю водних течій. Після ядерних випробувань (станом на 1979 рік), більша частина тритію (146 кг) була виявлена в Тихому океані та в Атлантиці, 6 кг в Арктичному басейні і по 6 кг в Індійському океані та в Антарктиці [22].

Головними транзитними шляхами, які обумовили перенесення тритію у водах світового океану, була система планетарних океанських течій, які не тільки переміщали тритій у поверхневому шарі води, але й обумовлювали формування профілю деякого збільшення концентрацій тритію до глибини 1 000 м – до $1,2 \text{ Бк} \times \text{дм}^{-3}$ у північній частині Тихого Океану і до $0,36 \text{ Бк} \times \text{дм}^{-3}$ у західній Атлантиці. Отримані Остлундом і Файном аналітичні дані, були підтверджені більш новітніми дослідженнями [23], які дозволили встановити певну нерівномірність розподілу концентрацій тритію в водах світового океану і, використовуючи його як геохімічний індикатор, визначити деякі закономірності поверхневої та глибинної міграції великих водних мас, переміщення яких має великий вплив на світовий клімат.

Міграція тритію у поверхневих водоймах і водотоках. В континентальній частині земної біосфери природний тритій обумовив формування фонових концентрацій у різних її компонентах. В подальшому вміст тритію в більшості водойм визначався надходженням до них тритію, що утворився внаслідок глобальних ядерних випробувань. Після екстремальних концентрацій тритію, зафіксованих у 1963 році, відбувалося поступове їх експоненційне зниження з періодом напіввиведення 3,2 роки.

Об'ємна активність тритію, пов'язаного з ядерними випробуваннями, в прісноводних водоймах осереднено оцінюється величиною $5\text{--}15 \text{ Бк} \times \text{дм}^{-3}$ [16]. У річках східної Європи та поверхневих водах морів, що мають обмежений водообмін з океанами (Балтійське, Чорне море та ін.), в 1975 и 1976 рр. спостерігалася концентрація тритію близько $11 \text{ Бк} \times \text{дм}^{-3}$.

Тритій природного чи техногенного генезису, що потрапив в атмосферу з різних джерел і переноситься повітряними потоками, потрапляє до земної поверхні з опадами або шляхом обміну між паровою та ґрунтовими і поверхневими водами. Такий обмін є безперервним і домінуючим для приповерхневої частини шлейфів поблизу землі і в певних метеорологічних умовах може супроводжуватися прямою конденсацією атмосферної тритійованої водяної пари на поверхні ґрунту. Як відзначав Сейкора [24], слабкі тривалі опади можуть призводити до більш високих концентрацій тритію в підземних водах, стоках, зливових стоках і ґрунтах, ніж потужні короточасні зливи.

Ступінь вилучення тритію з повітря атмосферними опадами, згідно Чамберлену і Егглтону [25], може бути розрахована за виразом (14):

$$\chi = \chi_0 \exp(-\lambda t) \quad (14)$$

де: χ – концентрація домішок у повітрі через години t ; χ_0 – концентрація домішок у повітрі на початку вимивання; λ – коефіцієнт вимивання домішок з атмосфери.

Коефіцієнт вимивання являє собою константу, яка входить до рівняння зміни концентрації домішок у повітрі і відображає швидкість видалення тритію з повітря дощем або снігом і, згідно [26] для дощу визначається на рівні $n \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ та для снігопаду інтенсивністю $1 \text{ мм} \times \text{год}^{-1}$ (водний еквівалент) на рівні $2,1 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ – $2,6 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ [27].

Концентрація тритію в масі поверхневих вод або у ґрунтовій поровій воді, відображає динамічну рівновагу між концентрації тритію у повітрі та воді і залежить від періоду водообміну у водоймі або у поверхневій ґрунтовій волозі. Так, тривалість водообміну в поверхневому ґрунті вимірюється місяцями, в ставках та озерах він коливається від тижнів до сотень років залежно від їх об'єму та динаміки розвантаження, в той час як у глибинних горизонтах може коливатися в межах від одного до тисячі років.

В динамічних водних системах відбувається майже миттєве розбавлення вилученої з повітря пари НТО проточною водою і подальша геохімічна історія таких надходжень цілком залежить від гідрологічної історії цих систем. Оскільки обмін між водою річкових систем та атмосферою регулюється природними процесами фазового переходу (випаровування, конденсації тощо) і осадженням, перенос тритію залежить від його концентрації в повітрі та воді, а конденсована фаза може дещо збагачуватися за рахунок ізотопного фракціонування. Обмін між тритійованою водою та донними відкладами в основному регулюється динамікою потоку води, яка збагачена тритієм, що обумовлюється незначною взаємодією між водою і твердими частинками.

За даними моніторингу поверхневих природних водойм України, вміст тритію у річках Псьол, Ворскла, Інгулець та Інгул, гідравлічно не з'єднаних із скидними каналами АЕС, не перевищує $8\text{--}14 \text{ Бк} \times \text{дм}^{-3}$ і може вважатися як фоновий, обумовлений глобальним колообігом важкого ізотопу водню [28]. Дещо інші концентрації тритію встановлюються при моніторингу в річках, де є гідравлічний зв'язок зі скидними каналами АЕС України (рис. 3). Встановлено, що в зоні впливу Рівненської АЕС у воді річки Стир на вхідному

(вище АЕС за течією) та вихідному (нижче за течією) створах концентрації тритію у воді коливалися від $6 \text{ Бк} \times \text{дм}^{-3}$ до $50 \text{ Бк} \times \text{дм}^{-3}$. В зоні впливу Хмельницької АЕС вміст тритію у воді р. Горинь у середньому на вихідному створі в осінньо-зимову межень може дорівнювати $14 \text{ Бк} \times \text{дм}^{-3}$, у літню межень – $24 \text{ Бк} \times \text{дм}^{-3}$, у весняну повінь – $10 \text{ Бк} \times \text{дм}^{-3}$. На створах ЗАЕС у воді р. Дніпро до знищення дамби Каховського водосховища спостерігалися коливання концентрації тритію в літню і осінню межень від 16 до $40 \text{ Бк} \times \text{дм}^{-3}$.

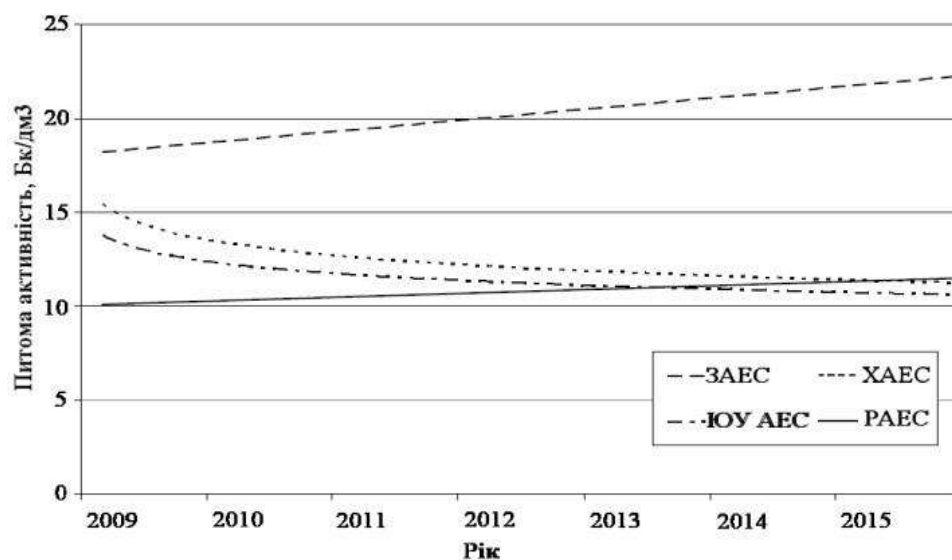


Рис. 3. Динаміка і прогноз вмісту тритію у вихідних створах АЕС України на річках Горинь, Стир, П. Буг і Каховському водосховищі, $\text{Бк} \times \text{дм}^{-3}$. ЗАЕС, ХАЕС, ЮУАЕС, РАЕС – Запорізька, Хмельницька, Південно-Українська та Рівненська АЕС [28] / Fig. 3. Dynamics and forecast of tritium content in the outlet of Ukrainian NPPs on the Goryn, Styr, P. Bug rivers and Kakhovka reservoir, $\text{Bq} \times \text{dm}^{-3}$. ZNPP, KhNPP, SUNPP, RNPP – Zaporizhzhya, Khmelnytsky, South Ukrainian and Rivne NPPs [28]

Майже такими ж були встановлені межі коливань концентрації тритію у воді р. Південний Буг в зоні впливу ПУАЕС – від 7 до $30 \text{ Бк} \times \text{дм}^{-3}$.

У воді Київського та Канівського водосховищ Дніпровського каскаду та р. Прип'ять концентрації тритію становили від 9 до $29 \text{ Бк} \times \text{дм}^{-3}$. Дещо більші концентрації тритію ($20\text{--}55 \text{ Бк} \times \text{дм}^{-3}$) були виявлені у воді р. Десна, що можна пояснити скидами зі Смоленської та Курської АЕС Російської Федерації.

Для всіх АЕС України характерним є те, що за рахунок рідинних скидів активність тритію в ставках-охолоджувачах та найближчих водоймах досягає декількох сотень $\text{Бк} \times \text{дм}^{-3}$. Технологічна продувка знижує активність тритію в ставках-охолоджувачах і збільшує її в прилеглих водоймах. Однак незначне забруднення цих водойм (до кількох десятків $\text{Бк} \times \text{дм}^{-3}$) має локальний характер.

Спостереженнями у 9 точках біля узбережжя о. Долобецький (м. Київ) в період з квітня 2009 р. до листопада 2010 р. встановлено, що вміст тритію у дніпровській воді в межах Київської

міської агломерації коливався від 5,4 до $17,7 \text{ Бк} \times \text{дм}^{-3}$ (в середньому $9,1 \text{ Бк} \times \text{дм}^{-3}$). Максимальні концентрації спостерігалися улітку, мінімальні – пізньої осені та ранньої весни і досить вірогідно, що ці показники суттєво не змінилися до цього часу.

Гідрогеоміграція тритію у підземних водоносних горизонтах. Серед усіх джерел підземних вод, які використовуються для питного водопостачання, найменша активність тритію спостерігається в артезіанських свердловинах. У воді зі свердловин м. Києва, що експлуатують сеноман-келовейський водоносний комплекс, середня питома активність тритію дорівнює $5,6 \text{ Бк} \times \text{дм}^{-3}$. Час надходження поверхневих вод до цього комплексу становить від 10 до 12 років. Дещо вищі значення активності тритію встановлено у воді криниць, які дренають значною мірою незахищені ґрунтові водоносні горизонти, – до $6,3 \pm 0,9 \text{ Бк} \times \text{дм}^{-3}$ [16].

В умовах недостатньої захищеності водоносних горизонтів суттєве збільшення концентрації тритію у підземних водах може відбуватися

внаслідок інфільтрації з поверхневих водних басейнів, особливо при техногенних аваріях на об'єктах ядерної енергетики та сховищах РАВ. Окрім значної кількості підприємств ядерного паливно-енергетичного комплексу (АЕС та підприємства з переробки ВЯП) у різних країнах світу споруджено і експлуатується 64 приповерхневих сховищ РАВ [29]. Будуються і виконуються роботи з проектування та визначення місць розташування ще 25 аналогічних сховищ.

Одним з шляхів впливу приповерхневих пунктів збереження РАВ на біосферу є гідрогеофільтрація тритійованої води крізь зону ненасиченої фільтрації (аерації) геологічного середовища, яка є природним і останнім бар'єром на шляху міграції цього нукліду до водоносних горизонтів. Як показує світова практика, при експлуатації ПЗРВ може відбуватися порушення щільності інженерних бар'єрів і потрапляння вологи в ємності з РАВ. За час довготривалого зберігання джерел іонізуючого випромінювання та інших радіоактивних матеріалів, що надходять з промислових, наукових та медичних установ, тритій може вивільнюватися із накопичених у сховищах радіоактивних матеріалів, утворюючи в присутності конденсаційної вологи тритійовану воду НТО. Експериментально показано [16], що леткі форми тритію можуть проникати не лише крізь найменші пори та щілини, але й дифундувати крізь бетон сховищ, метали, резину та полімерні матеріали і, таким чином, надходити в оточуюче середовище. Підтвердженням цього є свідчення у світових публікаціях про встановлення підвищених концентрацій тритію в підземних водах поблизу сховищ РАВ.

У 1993 році було виявлено витік тритію в ґрунтові води зі сховищ, розташованих у лісі Барткушкіс приблизно в 30 км від Вільнюса, столиці Литви, в місці з болотистим середовищем, чутливим до міграції радіонуклідів в біоті [30]. Встановлено, що тритій вивільнюється зі сховищ шляхом випаровування крізь бетон інженерних бар'єрів у ґрунт та шляхом вимивання тритію з раніше забруднених шарів зони ненасиченої фільтрації внаслідок підвищення рівня ґрунтових вод. Найвищі концентрації тритію в ґрунті спостерігалися в 2005 році, коли максимальна питома активність в ґрунтовій волозі дорівнювала близько 1×10^5 Бк $\times$ дм $^{-3}$.

На приповерхневому сховищі Шеффілд (США Іллінойс) внаслідок руйнування контейнерів у 1982 році відбулося вимивання тритію з розміщених там РАВ, що призвело до суттєвого підвищення концентрації тритію в поровій та ґрунтовій воді до $4,5 \times 10^4$ Бк $\times$ дм $^{-3}$ [31].

Головним сховищем Великобританії для утилізації радіоактивних відходів низького рівня є приповерхнєве ПЗРВ Дрігг, розташоване на

прибережній рівнині Західної Камбрії приблизно в 0,5 км від берега Ірландського моря. Основними інженерними спорудами є траншеї з бетонними стінами і основою з контрольованою дренажною системою [29]. Підвищені концентрації тритію у гідрогеофільтраційному потоці за межами інженерних бар'єрів були зафіксовані на рівнях від 4×10^5 Бк $\times$ дм $^{-3}$ до $3,8 \times 10^6$ Бк $\times$ дм $^{-3}$ та поступовим зниженням концентрації тритію до $1,3 \times 10^5$ Бк $\times$ дм $^{-3}$ після прийняття додаткових обмежувальних заходів [32].

Підвищені концентрації тритію виявлено також в місцях розміщення приповерхневих пунктів збереження РАВ Канади, Франції, Угорщини, Латвії. Зокрема, у підземних водах зони впливу сховища Center de la Manche (м. Шербург, Франція) концентрації тритію сягали $(17-20) \times 10^3$ Бк $\times$ дм $^{-3}$ (1997–2002 рр.) з наступним зменшенням до $(7-13) \times 10^3$ Бк $\times$ дм $^{-3}$ (2008 р.) [33]. Тритієве забруднення підземних вод у зоні впливу приповерхневого сховища РАВ Угорщини у 2008 р. сягало $n \times 10^4$ Бк $\times$ дм $^{-3}$ [34]. В підземних водах приповерхневого ПЗРВ Baldone (Латвія) у 1997 р. спостерігався підвищений (до 2×10^5 Бк $\times$ дм $^{-3}$) вміст тритію з поступовим (за 11 років) зменшенням до $(7-8) \times 10^3$ Бк $\times$ дм $^{-3}$ [35].

Діючі в Україні ПЗРВ, які були споруджені на початку 60-х років минулого століття із проектним строком використання біля 30 років, морально і технічно застаріли і є потенційним джерелом тритію в природно-техногенних системах. При проведенні радіоекологічних досліджень у місцях розміщення сховищ РАВ було виявлено поширення тритієвого забруднення в геологічному середовищі інфільтраційним гідрогеоміграційним шляхом [36]. В межах зони впливу ПЗРВ КДМСК УкрДО «Радон» довготривале функціонування гідрогеофільтраційного потоку тритію у системі «зона аерації – підземний водоносний горизонт» обумовило утворення мобільної і структурованої радіогідрогеохімічної аномалії, яка значно перевищує планові розміри ємностей РАВ і територію ПЗРВ [37]. При цьому, напрямок і інтенсивність гідрогеофільтраційних потоків тритію визначалися динамікою зміни інтенсивності витоку тритійованої води зі сховищ РАВ, а також особливостями палеорельєфу і геоструктурного плану поверхні водотривкого горизонту, який підстеляє перший від денної поверхні підземний водоносний горизонт.

Аналогічні явища виходу тритійованої води за межі інженерних бар'єрів були зафіксовані також на інших ПЗРВ України. Так, на Харківському ДМСК рівень забруднення підземного водоносного горизонту в контурі $n \times 10^5$ Бк $\times$ дм $^{-3}$ тритію вийшов за межі території ПЗРВ з подальшим поступовим зменшенням його концентрації у

першому водоносному горизонті [38]. Разом з тим, встановлюється проникнення тритійованої води крізь місцевий водотривкий горизонт у другий водоносний горизонт.

На Дніпропетровському ДМСК під час виконання співробітниками відділу біогеохімії ІГНС НАН України радіоекологічної оцінки захищеності прилеглих територій виявлено радіогідрогеохімічну аномалію під сховищами РАВ в зоні ненасиченої фільтрації [37]. В чорноземі (верхній частині ґрунтового профілю) та лесовидних супісках концентрація тритію складала до $(4,5-5,5) \times 10^3$ Бк $\times$ дм $^{-3}$. При цьому, адсорбційні властивості геологічного середовища дозволили захистити першій від поверхні водоносний горизонт, в якому безпосередньо під радіогідрогеохімічною аномалією, сформований в зоні аерації, концентрація тритію не перевищувала 55–110 Бк $\times$ дм $^{-3}$.

Таким чином, значним джерелом надходження тритію у підземні води наразі є сховища з високою концентрацією РАВ, де існуючі інженерні споруди не достатньо забезпечують надійність ізоляції накопичених у сховищах забруднених тритієм вод від геологічного середовища і яке, в даному разі, слугує останнім бар'єром на шляху гідрогеофільтраційної міграції тритію та довготривалим депозитарієм цього радіоактивного ізотопу водню.

Висновки. 1. Тритій, утворений внаслідок природних чи техногенних процесів, включається в міграційні потоки в залежності від форм його знаходження – газової (НТ), водної (НТО) та органічно зв'язаної (ОЗТ). Відповідно до цих форм відбувається перерозподіл тритію між різними компонентами природно-техногенних біогеосистем. Включаючись в різноманітні рухи атмосфери, поверхневих і підземних потоків, тритій поширюється в навколишньому середовищі згідно закономірностей колообігу водню в природі.

2. При атмогеоміграції зменшення концентрації тритію відбувається згідно законів дифузії у повітряних шлейфах. Частина тритію з атмосферними опадами потрапляє на поверхню водойм, де розбавляється до фонових концентрацій, на рослинність та ґрунт. Подальша геохімічна історія цих випадін визначається законами біогеохімічної та гідрогеохімічної міграції і включенням у короткостроковий і довгостроковий колообіг у біосфері.

3. Встановлено, що поширення атмогеохімічної аномалії тритію частково залежить від

узагальненої за контрольний період рози вітрів. Більш значуще на інтенсивність і напрямок атмогеохімічної міграції тритію впливають конструктивні особливості конфайнменту, геоморфологічні та ландшафтно-геохімічні чинники (форми рельєфу, тип і структура лісової екосистеми) та наявність технологічних приміщень, що відіграють роль природних та техногенних бар'єрів на шляху руху повітряних мас.

4. Тритій, як ізотоп водню, бере участь в усіх процесах біогеоміграції, що визначається біологічною роллю води та органічної речовини. Основними шляхами надходження тритію в рослини є засвоєння водної і парової фаз НТО, що переносяться при атмогеохімічній міграції та вимиваються з повітря атмосферними опадами.

Основні біофізичні процеси, що визначають біогеоміграцію тритію:

- початкове осаджування на поверхню ґрунту і рослинність;
- перетворення НТ в НТО в ґрунті шляхом бактеріального окиснення;
- поглинання НТО рослинами з перетворенням частини НТО в органічно зв'язану форму (ОЗТ);
- транспортування НТО в ґрунті та поглинання НТО корінням;
- реемісія НТО в атмосферу з ґрунту і рослин.

5. Гідрогеохімічна міграція тритію у поверхневих водоймах і водотоках обумовлює його розбавлення до фонових концентрацій. У скидах АЕС України в рр. Дніпро (Каховське водосховище), Горинь, Стир, П. Буг на вихідних, нижче за течією, створах концентрації тритію на перевищують 20–50 Бк $\times$ дм $^{-3}$.

6. Визначено головні фактори, що впливають на формування гідрогеофільтраційного потоку тритію в геологічному середовищі. До них відносяться: інтенсивність виходу тритійованої води зі сховищ РАВ, гідравлічна проникність, гідрофізичні параметри та мінеральний склад зони ненасиченої фільтрації, рельєф поверхні водотривкого горизонту та сезонні коливання надходження атмосферних опадів до місцевого водоносного горизонту. Довготривале функціонування гідрогеофільтраційних потоків тритію у системі «зона аерації – підземний водоносний горизонт» обумовлює його виявлення на відстанях, що значно перевищують планові розміри ємностей і території пунктів збереження радіоактивних відходів.

Список використаних джерел

1. Harteck, P. (1954). The relative abundance of HT and HTO in the atmosphere. *Journal of Chemical Physics*, 22(10), 1746–1751. <https://doi.org/10.1063/1.1740404>
2. Jacobs, D. G. (1968). Sources of tritium and its behavior upon release to the environment (AEC Critical Review Series). Oak Ridge, TN: U.S. Atomic Energy Commission. <https://doi.org/10.2172/4799828>

3. Burger, L. L. (1976). The conversion of tritiated hydrogen to water in the atmosphere. Pacific Northwest Laboratories. <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc1445044/>
4. Delaporte-Mathurin, R., Goles, N., Ball, J., Dunn, C., Edwards, E., Ferry, S., Lamere, E., Lanzrath, A., Leccacorvi, R., Meschini, S., Peterson, E., Segantin, S., Vieira, R., Whyte, D., Zhou, W., & Woller, K. (2024). Advancing tritium self-sufficiency in fusion power plants: Insights from the BABY experiment. arXiv preprint arXiv:2412.02721. <https://arxiv.org/abs/2412.02721>
5. Yang, J. Y., & Gevantman, L. R. (1964). Tritium β -radiation-induced isotopic exchange with water vapor. *The Journal of Physical Chemistry*, 68(11), 3115–3119. <https://doi.org/10.1021/j100793a005>
6. McFarlane, J. C., Rodgers, R. D., & Bradley Jr., D. V. (1979). Tritium oxidation in surface soils: A survey of soils near five fuel reprocessing plants. *Environmental Science & Technology*, 13(5), 607–608.
7. World Health Organization. (1983). *Environmental health criteria 25: Selected radionuclides – Tritium*. Geneva: WHO.
8. International Atomic Energy Agency. (2001). *Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment (Safety Reports Series No. 19)*. Vienna: IAEA.
9. Chakin, V., Rolli, R., Gaisin, R., & van Renterghem, W. (2023). Tritium desorption behavior and microstructure evolution of beryllium irradiated at low temperature up to high neutron dose in BR2 reactor. *Journal of Nuclear Engineering*, 4(3), 552–564. <https://doi.org/10.3390/jne4030036>
10. Matiatos, I., Tsangaratos, P., Copia, L., & Araguás-Araguás, L. (2025). Revisiting the historical tritium levels in precipitation in Greece—Preliminary assessment of groundwater transit times. *Journal of Environmental Radioactivity*. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2025.107619>.
11. Beyerle, U., Aeschbach-Hertig, W., Hofer, M., et al. (1999). Infiltration of river water to a shallow aquifer investigated with $3\text{H}/3\text{He}$, noble gases, and CFCs. *Journal of Hydrology*, 220(3–4), 169–185.
12. Chaparro, M. C., & Saaltink, M. W. (2022). Tritium transport in non-saturated concrete under temperature fluctuations. *Journal of Environmental Radioactivity*, 251–252, 106969. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.106969>
13. Glugla, M., Murdoch, D. K., Antipenkov, A., et al. (2006). ITER fuel cycle R&D: Consequences for the design. *Fusion Engineering and Design*, 81(1–4), 733–744.
14. Pasquill, F. (1962). *Atmospheric diffusion: The dispersion of windborne material from industrial and other sources*. London: Van Nostrand Reinhold.
15. Пушкар'юв, О. В., Пушкар'юва, Р. О., Яковлев, Є. О., Колтунов, Б. Г., & Приймаченко, В. М. (2004). Атмосферна міграція тритію зі сховищ радіоактивних відходів і його розподіл у ґрунтово-рослинному комплексі. *Мінеральні ресурси України*, (1), 39–41.
16. Долін, В. В., Пушкар'юв, О. В., Шраменко, І. Ф., та ін. (2012). *Тритій в біосфері*. Київ: Наукова думка.
17. Butler, H. L. (1963). Tritium hazards in heavy-water-moderated reactors. *Nuclear Safety*, 4(3), 77–82.
18. Mattle, N., Kinzelbach, W., et al. (2001). Exploring an aquifer system by integrating hydraulic, hydrogeologic, and environmental tracer data in a three-dimensional hydrodynamic transport model. *Journal of Hydrology*, 242(3–4), 183–196.
19. International Atomic Energy Agency. (2014). *Transfer of tritium in the environment after accidental releases from nuclear facilities (IAEA-TECDOC-1738)*. Vienna: IAEA.
20. Pasler, V., Arbeiter, F., Klein, C., Klimenko, D., & Schlindwein, G. (2021). Development of a component-level hydrogen transport model with OpenFOAM and application to tritium transport inside a DEMO HCPB breeder. *Applied Sciences*, 11(8), 3481. <https://doi.org/10.3390/app11083481>
21. National Council on Radiation Protection and Measurements. (1979). *Tritium in the environment (NCRP Report No. 62)*. Bethesda, MD: NCRP.
22. Östlund, H. G., & Fine, R. A. (1979). Oceanic distribution and transport of tritium. In *Behavior of Tritium in the Environment* (314–324). Vienna: IAEA.
23. Oms, P. E., Bailly Du Bois, P., Dumas, F., et al. (2019). Inventory and distribution of tritium in the oceans in 2016. *Science of the Total Environment*, 656, 1289–1303.
24. Sejkora, K. (2006). Atmospheric sources of tritium and potential implication to surface and groundwater monitoring efforts. In *Proceedings of the 16th Annual RETS-REMP Workshop* (26–28). Mashantucket.
25. Chamberlain, A. C., & Eggleton, A. E. J. (1964). Washout of tritiated water vapour by rain. *International Journal of Air and Water Pollution*, 8, 135–149.
26. Ebina, T., Rwaichi, J. A., Minja, I., Nagase, T., Onodera, Y., & Chatterjee, A. (2004). Correlation of hydraulic conductivity of clay-sand compacted specimens with clay properties. *Applied Clay Science*, 26, 3–12.
27. Davis, P. A. (1997). Tritium transfer parameters for the winter environment. *Journal of Environmental Radioactivity*, 36(2–3), 177–196.
28. Васильченко, В. М., Давидов, М. М., Масько, О. М., & Чернов, П. А. (2013). Моніторинг тритію в природних поверхневих водоймах України. *Ядерна енергетика та довкілля*, (1), 14–21. <https://doi.org/10.31717/2311-8253>
29. Han, K. W., Heinonen, J., & Bonne, A. (1997). *Radioactive waste disposal: Global experience and challenges*. IAEA Bulletin, 39(1), 33–41.
30. Gudelis, A., & Gorina, I. (2015). On release of radionuclides from a near-surface radioactive waste repository to the environment. *Nukleonika*, 60(3), 551–555.

31. Peters, C. A., Striegl, R. G., Mills, P. C., & Healy, R. W. (1992). *Effects of low-level radioactive-waste disposal on water chemistry in the unsaturated zone at a site near Sheffield, Illinois, 1982–84*. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper, 80.
32. LLW Repository Ltd. (2010). *Review of leachate, groundwater and surface water monitoring (RP/DR-GEN/PROJ/00035, Issue 2)*.
33. ANDRA. (2009). *Centre de stockage de la Manche: Rapport annuel 2008*. Beaumont-Hague: ANDRA.
34. Ormai, P. (2009). *Surveillance of non-radiological parameters: Planning of the post-closure surveillance programme*. In *Proceedings of the IAEA/ANDRA International Workshop on Post-operational Environmental Monitoring and Surveillance of Disposal Facilities for Radioactive Waste (22–25)*. Cherbourg, France.
35. BAPA. (2009). *Atskaite radioaktīvo atkritumu glabātavas „Radons” valsts nozīmes jonizējošā starojuma objektu kontroles programmas izpilde 2008. gadā (158 p.)*. Riga, Latvia: BAPA.
36. Vagner, I., Varlam, C., Faurescu, I., Faurescu, D., & Bogdan, D. (2024). *Tritium behavior from vine to wine*. *Applied Sciences*, 14(13), 5478. <https://doi.org/10.3390/app14135478>
37. Пушкаръов, О. В., Яковлев, С. О., Пушкаръова, Р. О., Колтунов, Б. Г., Летучий, О. М., та ін. (2003). *Гідрогео-міграція тритію в місцях розміщення сховищ РАВ. Мінеральні ресурси України*, (2), 38–40.
38. Коваленко, Г. Д. (2013). *Радиоэкология Украины (344)*. Харків: ІД «Інжсек».

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Migration of tritium in the components of the natural environment

Oleksandr Pushkarov¹

DSc (Geology), Senior Researcher, Leading Researcher,

¹ SE “Institute of Environmental Geochemistry of the NAS of Ukraine”, Kyiv, Ukraine;

Iryna Sevruck¹

PhD (Geology), Senior Researcher, Deputy Director;

Ivan Shramenko¹

PhD (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Leading Researcher;

Oleksandr Zubko¹

Researcher;

Volodymyr Viter¹

PhD (Chemical), Head of the laboratory

ABSTRACT

Formulation of the problem. Tritium formed as a result of natural or man-made processes is included in migration flows depending on the forms of its presence – gaseous (NT), aqueous (NTO) and organically bound (OZT). According to these forms, tritium is redistributed among various components of the natural environment and distributed in the environment according to the laws of the hydrogen cycle in nature.

Materials and methods. During atmospheric transport, the tritium concentration decreases according to the laws of diffusion in air plumes. Part of tritium with atmospheric precipitation falls on the surface of water bodies, where it is diluted to background concentrations, on vegetation and soil. The further geochemical history of these precipitations is determined by the laws of biogeochemical and hydrogeochemical migration and inclusion in the short-term and long-term cycles in the biosphere.

Results. According to the results of monitoring the content of tritium in the snow cover and in atmospheric moisture in the zone of influence of radioactive waste preservation (SFRW) projects, it was determined that the formation of at-mo-geochemical anomalies of tritium depends on the constructive features of the confinement, geomorphological and landscape-geochemical factors (relief forms, type and structure of the forest ecosystem), the presence of technological premises, which play the role of natural and man-made barriers in the way of the movement of air masses, as well as from the wind rose generalized for the control period. Biogeochemical migration of tritium occurs with water from atmospheric precipitation in the soil-plant system. Tritium, like a hydrogen isotope, participates in all processes of biogeomigration, which is primarily determined by the biological role of water and organic matter. The main biophysical processes determining the biogeomigration of tritium include: initial deposition on the surface of the soil and vegetation, conversion of tritiated hydrogen (HT) into tritiated water (HTO) in the soil due to bacterial oxidation, absorption of HTO by plants with the conversion of a part of HTO into an organically bound form (OZT), transportation of HTO in soil and absorption of HTO by roots, re-emission of HTO into the atmosphere from soil and plants. Hydrogeochemical migration of tritium in surface reservoirs and watercourses causes its dilution to background concentrations. Yes, in discharges from the nuclear power plants of Ukraine in Dnipro (Kakhovsky Reservoir), Horyn, Styr, P. Bug on the weekend, downstream of the tritium concentrations exceed $20\text{--}50 \text{ Bq}\cdot\text{dm}^{-3}$.

Conclusions. According to the results of radio-hydrogeological monitoring of the territories adjacent to the SFRW, the main factors influencing the formation of tritium hydrogeofiltration flows in the geological environment were determined. These include: the intensity of the release of tritiated water from RAW storage facilities, hydraulic permeability, hydrophysical parameters and the mineral composition of the zone of unsaturated filtration, the topography of the surface of the water-resistant horizon and seasonal fluctuations in the amount of atmospheric precipitation to the local aquifer. The long-term operation of tritium hydrogeofiltration flows in the system "aeration zone (ZA) – underground aquifer (SAW)" causes their spread to a distance that significantly exceeds the planned dimensions of the containers and the territory of the SFRW.

Keywords: tritium, forms of tritium detection, natural environment, atmospheric geomigration, biogeomigration, hydrogeomigration.

References

1. Harteck, P. (1954). The relative abundance of HT and HTO in the atmosphere. *Journal of Chemical Physics*, 22, 1746–1751.
2. Jacobs, D. G. (1968). Sources of tritium and its behavior upon release to the environment (AEC Critical Review Series). Oak Ridge, TN: USAEC. <https://doi.org/10.2172/4799828>
3. Burger, L. L. (1976). Conversion of tritiated hydrogen to water in the atmosphere (BNWL-2113). Richland, WA: Pacific Northwest Laboratories. <https://doi.org/10.2172/7330458>
4. Delaporte-Mathurin, R., Goles, N., Ball, J., Dunn, C., Edwards, E., Ferry, S., Lamere, E., Lanzrath, A., Leccacorvi, R., Meschini, S., Peterson, E., Segantin, S., Vieira, R., Whyte, D., Zhou, W., & Woller, K. (2024). Advancing tritium self-sufficiency in fusion power plants: Insights from the BABY experiment. *arXiv preprint arXiv:2412.02721*. <https://arxiv.org/abs/2412.02721>
5. Yang, J. Y., & Gevantman, L. R. (1964). Tritium β -radiation-induced isotopic exchange with water vapor. *Journal of Physical Chemistry*, 68(11), 3115–3119. <https://doi.org/10.1021/j100793a005>
6. McFarlane, J. C., Rodgers, R. D., & Bradley, D. V. Jr. (1978). Environmental tritium oxidation in surface soil. *Environmental Science & Technology*, 12(5), 590–593. <https://doi.org/10.1021/es60141a003>
7. World Health Organization. (1983). Environmental health criteria 25: Selected radionuclides – Tritium. Geneva: WHO. Retrieved from <https://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc25.htm>
8. International Atomic Energy Agency. (2001). Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment (Safety Reports Series No. 19). Vienna: IAEA. Retrieved from <https://www.iaea.org/publications/6024/generic-models-for-use-in-assessing-the-impact-of-discharges-of-radioactive-substances-to-the-environment>
9. Chakin, V., Rolli, R., Gaisin, R., & van Renterghem, W. (2023). Tritium desorption behavior and microstructure evolution of beryllium irradiated at low temperature up to high neutron dose in BR2 reactor. *Journal of Nuclear Engineering*, 4(3), 552–564. <https://doi.org/10.3390/jne4030036>
10. Matiatos, I., Tsangaratos, P., Copia, L., & Araguás-Araguás, L. (2025). Revisiting the historical tritium levels in precipitation in Greece—Preliminary assessment of groundwater transit times. *Journal of Environmental Radioactivity*. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2025.107619>
11. Beyerle, U., Aeschbach-Hertig, W., Hofer, M., et al. (1999). Infiltration of river water to a shallow aquifer investigated with $3\text{H}/3\text{He}$, noble gases and CFCs. *Journal of Hydrology*, 220(3–4), 169–185.
12. Chaparro, M. C., & Saaltink, M. W. (2022). Tritium transport in non-saturated concrete under temperature fluctuations. *Journal of Environmental Radioactivity*, 251–252, 106969. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.106969>
13. Glugla, M., Murdoch, D. K., Antipenkov, A., et al. (2006). ITER fuel cycle R&D: Consequences for the design. *Fusion Engineering and Design*, 81(1–4), 733–744.
14. Pasquill, F. (1962). Atmospheric diffusion: The dispersion of windborne material from industrial and other sources. London: Van Nostrand.
15. Pushkarev, O. V., Pushkareva, R. O., Yakovlev, E. O., Koltunov, B. G., & Prymachenko, V. M. (2004). Atmogeomigration of tritium from radioactive waste storage facilities and its distribution in the soil-plant complex. *Mineral Resources of Ukraine*, (1), 39–41. [in Ukrainian]
16. Dolin, V. V., Pushkarev, O. V., Shramenko, I. F., et al. (2012). Tritium in the biosphere. Kyiv: Naukova Dumka. [in Ukrainian]
17. Butler, H. L. (1963). Tritium hazards in heavy-water-moderated reactors. *Nuclear Safety*, 4(3), 77–82.
18. Mattle, N., Kinzelbach, W., et al. (2001). Exploring an aquifer system by integrating hydraulic, hydrogeologic and environmental tracer data in a three-dimensional hydrodynamic transport model. *Journal of Hydrology*, 242(3–4), 183–196.
19. International Atomic Energy Agency. (2014). Transfer of tritium in the environment after accidental releases from nuclear facilities (IAEA-TECDOC-1738). Vienna: IAEA.
20. Pasler, V., Arbeiter, F., Klein, C., Klimenko, D., & Schlindwein, G. (2021). Development of a component-level hydrogen transport model with OpenFOAM and application to tritium transport inside a DEMO HCPB breeder. *Applied Sciences*, 11(8), 3481. <https://doi.org/10.3390/app11083481>
21. National Council on Radiation Protection and Measurements. (1979). Tritium in the environment (NCRP Report No. 62). Bethesda, MD: NCRP.

22. Östlund, H. G., & Fine, R. A. (1979). Oceanic distribution and transport of tritium. In *Behavior of Tritium in the Environment* (pp. 314–324). Vienna: IAEA.
23. Oms, P. E., Bailly Du Bois, P., Dumas, F., et al. (2019). Inventory and distribution of tritium in the oceans in 2016. *Science of the Total Environment*, 656, 1289–1303.
24. Sejkora, K. (2006). Atmospheric sources of tritium and potential implication to surface and groundwater monitoring efforts. In *Proceedings of the 16th Annual RETS-REMP Workshop* (pp. 26–28). Mashantucket, CT.
25. Chamberlain, A. C., & Eggleton, A. E. J. (1964). Washout of tritiated water vapour by rain. *International Journal of Air and Water Pollution*, 8, 135–149.
26. Ebina, T., Rwaichi, J. A., Minja, I., Nagase, T., Onodera, Y., & Chatterjee, A. (2004). Correlation of hydraulic conductivity of clay–sand compacted specimens with clay properties. *Applied Clay Science*, 26, 3–12.
27. Davis, P. A. (1997). Tritium transfer parameters for the winter environment. *Journal of Environmental Radioactivity*, 36(2–3), 177–196.
28. Vasylchenko, V. M., Davydov, M. M., Masko, O. M., & Chernov, P. A. (2013). Monitoring of tritium in natural surface waters of Ukraine. *Nuclear Energy and Environment*, (1), 14–21. <https://doi.org/10.31717/2311-8253> [in Ukrainian]
29. Han, K. W., Heinonen, J., & Bonne, A. (1997). Radioactive waste disposal: Global experience and challenges. *IAEA Bulletin*, 39(1), 33–41.
30. Gudelis, A., & Gorina, I. (2015). On release of radionuclides from a near-surface radioactive waste repository to the environment. *Nukleonika*, 60(3), 551–555.
31. Peters, C. A., Striegl, R. G., Mills, P. C., & Healy, R. W. (1992). Effects of low-level radioactive-waste disposal on water chemistry in the unsaturated zone at a site near Sheffield, Illinois, 1982–84 (U.S. Geological Survey Water-Supply Paper). Reston, VA: U.S. Geological Survey.
32. LLW Repository Ltd. (2010). Review of leachate, groundwater and surface water monitoring (RP/DR-GEN/PROJ/00035, 2).
33. ANDRA. (2009). Centre de stockage de la Manche: Rapport annuel 2008.
34. Ormai, P. (2009, September 22–25). Surveillance of non-radiological parameters: Planning of the post-closure surveillance programme. In *IAEA/ANDRA International Workshop on Post-operational Environmental Monitoring and Surveillance of Disposal Facilities for Radioactive Waste*, Cherbourg, France. Retrieved from https://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/WTS-Networks/DISPONET/disponetfiles/IntlWkp_Post_op%20Env_Monitoring_Surv_Disposal_Fac_RW_Cherbourg_FR2009/Surv_non-rad_parameters-PURAM.pdf
35. BAPA. (2009). Report on the implementation of the control program for ionizing radiation facilities of national significance at the “Radons” radioactive waste repository in 2008. Riga, Latvia: BAPA. [in Latvian]
36. Vagner, I., Varlam, C., Faurescu, I., Faurescu, D., & Bogdan, D. (2024). Tritium behavior from vine to wine. *Applied Sciences*, 14(13), 5478. <https://doi.org/10.3390/app14135478>
37. Pushkarev, O. V., Yakovlev, E. O., Pushkareva, R. O., Koltunov, B. G., & Letuchy, O. M. (2003). Hydrogeomigration of tritium in the locations of radioactive waste storage facilities. *Mineral Resources of Ukraine*, (2), 38–40. [in Ukrainian]
38. Kovalenko, G. D. (2013). Radioecology of Ukraine. Kharkiv: ID “Inzhnek”.

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 4 March 2025

Accepted 19 April 2025

Monitoring of groundwater storage changes using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellite mission: a case study of Sragen Regency, Indonesia

*Najm Al-Deen Moneer Hilal*¹

Master Program in Environmental Sciences, Graduate School,

¹ Universitas Sebelas Maret, Surakarta, Indonesia;

e-mail: najmmuneer2020@gmail.com,  <https://orcid.org/0009-0009-9428-0608>;

*Komariah*¹

PhD lecturer, Master Program in Environmental Sciences, Graduate School,

e-mail: komariah@staff.uns.ac.id,  <https://orcid.org/0000-0001-7704-0754>;

*Ari Handono Ramelan*¹

Professor lecturer, Master Program in Environmental Sciences, Graduate School,

e-mail: aramelan@mipa.uns.ac.id,  <https://orcid.org/0000-0003-0823-3186>;

*Keigo Noda*²

Associate Professor, Graduate School of Agricultural and Life Sciences,

² The University of Tokyo, Tokyo, Japan,

e-mail: nodakeigo@g.ecc.u-tokyo.ac.jp,  <https://orcid.org/0000-0002-0952-5044>

ABSTRACT

Problem Statement and Purpose. Groundwater is an important resource for agriculture, drinking water, and ecosystems in Sragen Regency, Central Java, Indonesia. However, the area is significantly water-stressed due to recurrent droughts, pollution, and unsustainable extraction methods. The aim of this study is to monitor the changes of groundwater storages during 2003-2024 using Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellite mission and Global Land Data Assimilation System (GLDAS) products into Google Earth Engine (GEE) to advance Sustainable Development Goal 6 (Clean Water and Sanitation) and SDG 13 (Climate Action).

Data and Method. The study employs GRACE data to analyze Total Water Storage (TWS) and the hydrological components - Soil Moisture SM and Snow Water Equivalent SWE- that GLDAS provides as a supplement. Merging these datasets within GEE seeks to understand groundwater trends from seasonal to long-term.

Result and Discussion. The study observed an average decrease in groundwater storage, with observed stresses during drier-than-usual periods in 2015-2016 and 2018-2020. Whereas, contrary to this long-term declining trend, the groundwater generally rises during wet seasons and falls again during dry seasons, demonstrating seasonality in storage. Furthermore, quantitative analysis revealed a net groundwater storage decline of approximately 15-20% during the 2003-2024 period, with critical depletion phases correlating with events (2015-2016) and prolonged droughts (2018-2020). The GRACE-GLDAS-GEE integration demonstrated high efficacy in detecting seasonal recharge cycles (+8-12 cm equivalent water height during monsoon months) versus dry-season depletion (-10-15 cm), providing unprecedented spatial-temporal resolution for this tropical agricultural region. This approach offers a scalable model for implementing SDG 6.4 (sustainable water withdrawals) through precision aquifer management in developing economies facing climate stress. The results should hasten the consideration of better water management approaches to stop further depletion of groundwater through methods such as managed aquifer recharge and maximizing irrigation efficiencies. This study provides a good example of using GRACE and GLDAS data adoption for regional groundwater monitoring, thus setting a solid basis for interventions aimed at alleviating water scarcity for Sragen Regency and beyond. This information will also serve as input in making decision-supporting management, aligning with SDG 6 targets for sustainable freshwater resource allocation and addressing challenges posed by climate variability and increasing anthropogenic pressures under SDG 13.

Keywords: Groundwater storage, GRACE satellite, GLDAS, Google Earth Engine, SDGs, Sragen Regency.

In cites: Hilal Najm Al-Deen Moneer, Komariah, Ramelan Ari Handono, Noda Keigo (2025). Monitoring of groundwater storage changes using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellite mission: a case study of Sragen Regency, Indonesia. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (62), 127-145. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-10>

1. Introduction

Groundwater is a critical resource for sustaining agriculture, drinking water supplies, and ecosystems in Sragen Regency, Central Java, Indonesia, directly supporting Sustainable Development Goal 6 (Clean Water and Sanitation). However, the region faces recurring droughts, with over 6,000 households affected in 2023 alone, leading to severe water scarcity and reliance on external water sources [1–3]. The

Bengawan Solo River, a primary water source, has been heavily polluted since 2015, rendering it unsuitable for irrigation and drinking, further exacerbating water stress [4, 5]. These challenges are compounded by unsustainable groundwater extraction practices, which have led to declining groundwater levels, hindering progress toward SDG 6 and exacerbating vulnerabilities under SDG 13 (Climate Action) [6–9].

Globally, groundwater depletion has been docu-

mented in regions such as the North China Plain [10], Northwest Bangladesh [11], South and Southeast Asian Countries [12], Nile River Basin (NRB) [13], Western Iran region in the Middle East [14], Central Valley in California [15], the High Plains Aquifer in the U.S. [16], Colorado River Basin in the American Southwest [17], and parts of India [18, 19], highlighting the widespread nature of this issue. In the Sragen Regency, the lack of localized, high-resolution data on groundwater storage changes has hindered effective water resource management. Traditional monitoring methods, such as well measurements, are often sparse and insufficient for capturing large-scale trends [15]. The Issue with depleting groundwater have arisen with varying severity degrees [20].

The GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) mission was a joint venture between NASA and the German Aerospace Center (DLR), launched on March 17, 2002, and concluded on October 27, 2017 [21, 22]. This mission consisted of two co-orbital satellites flying at an average altitude of around 450 km, separated by approximately 220 km [23, 24]. GRACE's primary objective was to measure the Earth's gravity field and its temporal variations, providing insights into mass changes within the Earth system [22, 23]. This mission utilized a K-band microwave ranging system to measure the distance and relative speed between the two satellites with high precision [22, 24].

GRACE data has been instrumental in studying terrestrial water storage changes, ice sheet mass balance, lacier mass variations, and sea level changes [22, 25]. The mission provided critical measurements for climate-related studies, including ocean dynamics, polar ice mass changes, and global groundwater changes [26, 27]. Following the success of GRACE, the GRACE Follow-On (GRACE-FO) mission was launched on May 22, 2018, to continue monitoring temporal mass variations within the Earth's system [26, 28].

GRACE-based total water storage (TWS) on land includes variations in groundwater, soil moisture, surface water, snow, and ice. TWS data from GRACE is used to quantify basin storage river discharge relationships [29–31], groundwater depletion [15, 29], evapotranspiration [32, 33]. Initiated in 2002, GRACE and follow-on missions, GRACE-FO, have provided a new perspective for monitoring changes in water resources [34]. By utilizing additional observations from various remote sensing platforms and land surface models and adjusting them, scientists have been able to resolve changes in groundwater storage within the great river basins around the globe [35]. Some studies used remote sensing data for indirect assessment of croplands conditions and drought stress through the calculation of specific vegetation indices [36]. This method has

successfully brought groundwater storage change in various regions across the globe [22]. One of the significant limitations of the GRACE data is low resolutions, which makes it difficult to apply small-scale groundwater monitoring [37]. Furthermore, GRACE provides the first opportunity to observe groundwater change directly from orbit. Using a variation of the Earth's gravitational field as a device, measurements are made to determine variations in the volume of water stored within a particular area, which then causes changes in gravity [38].

The problem of ensuring the population has access to quality drinking water and sustainable water supply for economic and industrial needs is one of the most important issues for any country [8]. This GRACE satellite mission offers a unique opportunity to monitor groundwater storage changes at a regional scale by measuring variations in Earth's gravity field, which are influenced by changes in water mass [34]. When combined with land surface models like the Global Land Data Assimilation System (GLDAS), GRACE data can isolate groundwater anomalies from other hydrological components, providing a comprehensive understanding of groundwater dynamics [7, 19, 22].

Despite GRACE data potential in groundwater monitoring, the application of this data in Sragen Regency remains underexplored, leaving a critical gap in understanding the region's groundwater trends and their implications for sustainable water management. So, this study aims to address this gap by leveraging GRACE and GLDAS data within the Google Earth Engine (GEE) platform to detect and analyze groundwater storage changes in the Sragen Regency. By providing insights into seasonal and long-term groundwater trends, this research will inform strategies for sustainable water resource management, helping mitigate droughts' impacts and ensure water security for the region's population.

2. Materials and Methods

Study Area. Sragen Regency is located in Central Java province, Indonesia, between 111° 01' 19.99" East Longitude and -7° 25' 35.00" South Latitude. It has 208 villages, 196 rural and 12 urban, across 20 districts. The total area is 994.57 km² (384.01 sq mi), and the population is 997,485 as of mid-2023 [39]. Fig. 1 shows the map of the administration in the research area.

Data Source. Three types of datasets derived from Landsat satellite imagery have been used to assess the groundwater storage:

1. **The GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) mission measures changes in Earth's gravity field, which measures Terrestrial Water Storage (TWS) data**, which is a combination of Groundwater Storage (ΔGW), Soil Moisture (ΔSM), Snow Water Equivalent

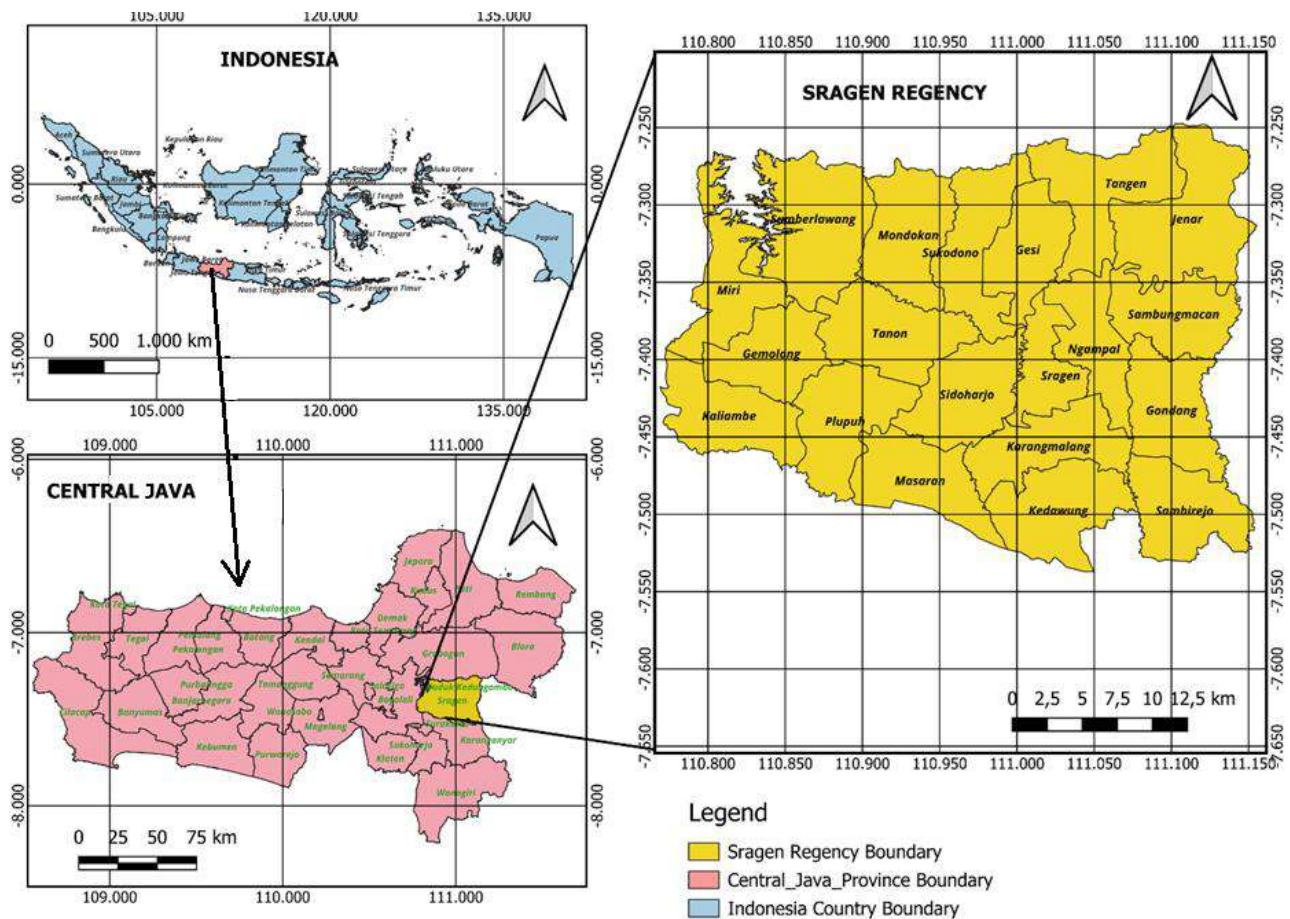


Fig. 1. Map of the Study Area, Sragen Regency, Central Java, Indonesia

- (Δ SWE), and Surface Water (Δ SW).
2. **GLDAS-2.1: Global Land Data Assimilation System** (Noah Model) included the features of Soil Moisture (SM) and Snow Water Equivalent (SWE).
 3. **The JRC Yearly Water Classification History dataset** provided the [Global Surface Water \(SW\) dataset](#).

Satellite-based GWS change derived from GRACE for changes in total water storage (Δ TWS) and GLDAS water content data [10, 18, 19]. All data were downloaded from 1 January 2003 and summarized in Table 1. The methodology proposed for estimating a change in groundwater storage is presented in the flow chart Fig. 2.

Data Analysis. To detect groundwater storage changes, this study combined **GRACE** and **GLDAS** datasets within Google Earth Engine (GEE) and applied a computational workflow to isolate groundwater anomalies; GRACE has the unique ability to track changes in total water storage anomalies (TWSa) directly, according to Eq.1.

$$\text{TWSa} = \text{CANa} + \text{SWa} + \text{SMa} + \text{SWEa} + \text{GWa} \quad (1)$$

Where:

CANa = Canopy Water Storage Anomaly

SWa = Surface Water Anomaly

SMA = Soil Moisture Anomaly

SWEa = Snow Water Equivalent Anomaly

GWa = Groundwater Storage Anomaly

The methodology involves the following steps:

Exploring the Study Area. In the following sections of code, shapefile of the study area loaded and imported from an Assets Fig. 3.

Tracking Total Water Storage Changes in the study area with GRACE. GRACE is able to monitor TWSa changes directly [38]. The regions that are receiving or losing water are indicated by changes in TWSa. In GEE, **GRACE Monthly Mass Grids Version 03 - Global Mascon (CRI Filtered)** dataset contains gridded monthly global water storage/height anomalies relative to a time-mean, derived from GRACE and GRACE-FO and processed at JPL using the Mascon approach (RL06.1Mv03).

This **GRACE Monthly Mass Grids Version 03 - Global Mascon (CRI Filtered)** dataset was employed as the primary data source for estimating groundwater storage changes and was selected due to its advanced mascon (mass concentration) approach, which provides higher spatial resolution and reduces leakage errors compared to traditional spherical harmonic solutions. The inclusion of Coastal Resolution Improvement (CRI) filtering further enhances the accuracy of the data, particularly in land and coastal re-

Table 1

Description of Datasets Sources

Satellite	Data obtained and date	Source	Product specifications	Band	Description	Units	Spatial / Temporal Resolution
GRACE and GRACE-FO	Terrestrial Water Storage (TWS) 01/01/2003 – 31/12/2024	JPL using the Mascon approach (RL06.1Mv03).	GRACE Monthly Mass Grids Version 03 - Global Mascon (CRI Filtered).	lwe_thickness	Equivalent liquid water thickness in centimeters	cm	55,660 meters.
GLDAS	Soil Moisture SM 01/01/2003 – 31/12/2024	National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)/Global Data Assimilation System (GDAS) atmospheric analysis fields.	GLDAS-2.1: Global Land Data Assimilation System.	Root-Moist_inst	Root zone soil moisture	kg/m ²	27,830 meters
	Snow Water Equivalent SWE 01/01/2003 – 31/12/2024			SWE_inst	Snow depth water equivalent	kg/m ²	
JRC	Surface Water (SW) 01/01/2003 – 31/12/2021	Joint Research Centre (JRC) of the European Commission.	JRC: Yearly Water Classification History, v1.4.	WaterClass	Classification of the seasonality of water throughout the year.		30 meters

gions, making it highly suitable for regional-scale groundwater studies. The GRACE data provides monthly terrestrial water storage (TWS) anomalies, which include contributions from groundwater, soil moisture, surface water, and snow. By isolating groundwater storage changes from TWS using complementary datasets like GLDAS, this study leverages the precision and reliability of the GRACE mascon data to analyze seasonal and long-term groundwater trends in the Sragen Regency. Integrating this dataset within Google Earth Engine allows for efficient processing, visualization, and interpretation of groundwater dynamics, ensuring robust and actionable insights for sustainable water resource management.

GRACE Data Processing. GRACE mission data are processed within Google Earth Engine (GEE) using a computational workflow from the primary data center: Jet Propulsion Laboratory (JPL) in Pasadena, California, United States. This processing is done using the following code Fig. 4.

Estimate the Linear Trend in TWSa Over Time. The TWSa trend was examined across the full record period 01/01/2003 – 31/12/2024. The Earth Engine has a capacity of fitting up linearly with time-series data; each pixel will have a general linear fit throughout all valuing the time. Following is the GEE code Fig. 5 for doing that.

GLDAS (NOAH Model). At a three-hour interval, the Global Land Data Assimilation System

(GLDAS) resolves global fluxes in the storage of energy and water (such as soil moisture and snow) using a number of land surface models [40]. *Table 1* shows the basic characteristics of the NASA GLDAS-2 data. This data was taken into consideration where soil moisture data is available in the band root zone moisture' and snow water depth and canopy storage in the band 'SWE_inst.'

Tracking Changes in Soil Water Storage, Snow Water Equivalent, and Surface Water Over Time. The three-hourly GLDAS data for Soil Moisture converted to annual SWEa from 2003 until 2024 can be found in the script "Soil_Moistur_SM" in Fig. 6. The same steps were applied for snow water equivalent "Snow_Water_Equivalent_SWE" in Fig. 7 and Surface Water from JRC data, which is available until 2021, shown in the script "Surface_Water_SW" in Fig. 8. Running the scripts is important to download all datasets for each variable over time and clarify how the image assets were created for each GLDAS and JRC dataset in this step.

GLDAS → GLDAS-2.1: Global Land Data Assimilation System.

- Soil Moisture Anomalies SMa → Band: 'RootMoist_inst'
- Snow Water Equivalent Anomalies SWEa → Band: 'SWE_inst'

Surface Water Anomalies SWa → JRC: Yearly Water Classification History, v1.4

Band: 'WaterClass'

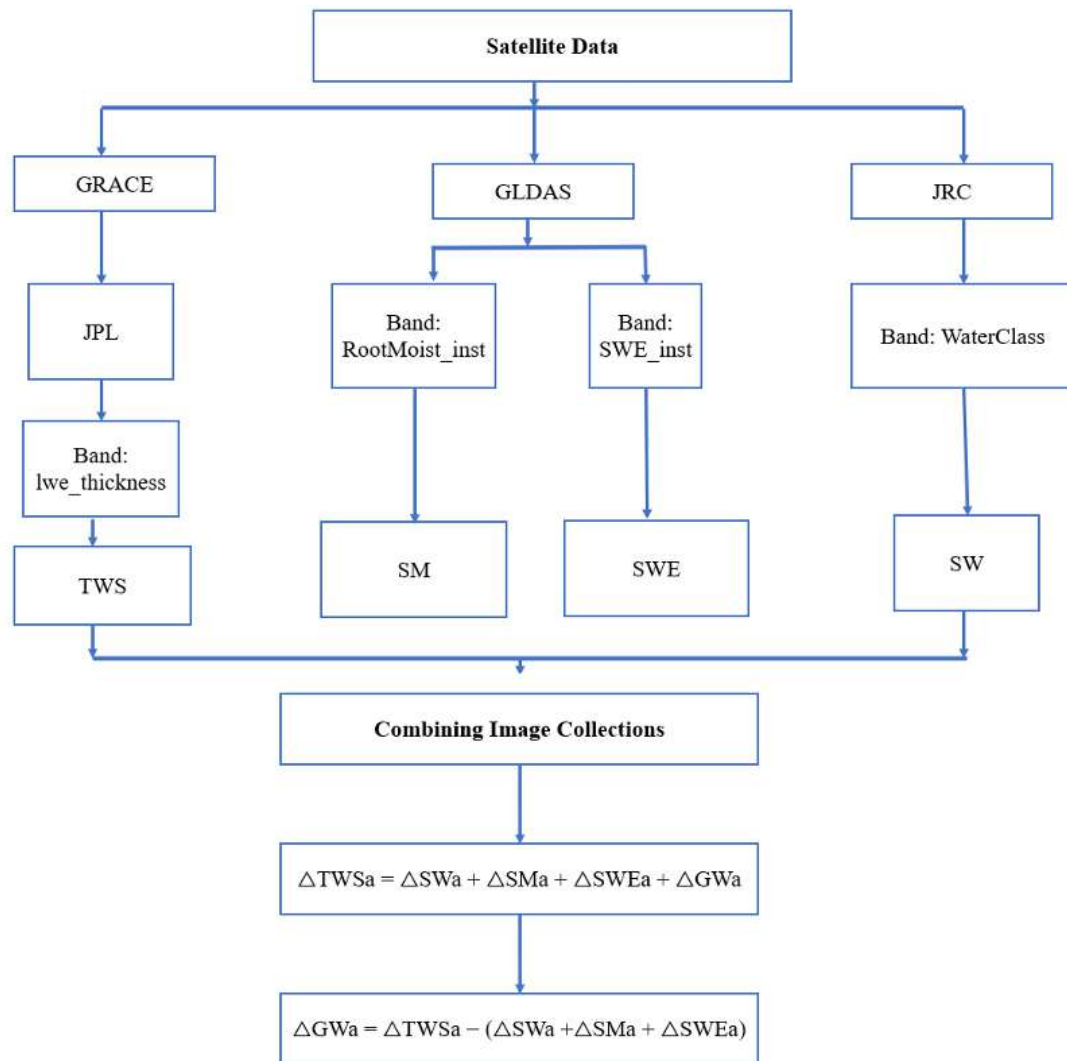


Fig. 2. Flowchart showing methodology for estimation of change in groundwater storage in the Study Area

```

// Load the shapefile of Sragen
var sragenShapefile = ee.FeatureCollection('projects/ee-najmhilal/assets/Sragen');

// Define the geometry of Sragen
var sragenGeometry = sragenShapefile.geometry();

// Center the map on Sragen
Map.centerObject(Sragen, 10);

// Add the shapefile to the map
Map.addLayer(sragenShapefile, {color: 'green'}, 'Sragen', true, 0.5);
  
```

Fig. 3. GEE Code to Import Shapefile of the Study Area

For the next analysis, GLDAS SMa and SWEa; JRC SWa datasets, which were process-sed by the methods above, were imported to GEE. At a temporal frequency of three hours, GLDAS estimations of snow water equivalent and soil moisture are resolved. Reducing the GLDAS data from the three-hour estimates to annual means has therefore taken time. To increase the efficiency of conducting this research, we also combined monthly GRACE measurements to annual average estimations.

Load GLDAS Soil Moisture and Snow Water Equivalent Images from an Asset to an Image

Collection. From 2003 until 2024, SM and SWE imported several assets. Additionally, the script was used to convert the list of annual mean soil moisture and snow water images to an ImageCollection. Before using Eq. 1 to calculate groundwater storage anomalies using GRACE and GLDAS data, we should check the units to make sure our calculations are correct. To find the units for "RootMoist_inst" and "SWE_inst," search for "GLDAS" in Earth Engine's "search bar," click on **GLDAS-2.1: Global Land Data Assimilation System**, and then select Bands. At the moment, the units for GLDAS bands


```
// Import Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) dataset
var GRACE = ee.ImageCollection("NASA/GRACE/MASS_GRIDS_V03/MASCON_CRI")

// Select the Liquid Water Equivalent thickness (LWE)
var sragenTWSa = GRACE.select('lwe_thickness');

// Filter GRACE data to Sragen
var sragenGRACE = sragenTWSa.filterBounds(sragenGeometry);

// Visualize the GRACE data for Sragen
Map.addLayer(sragenGRACE, {min: -25.0, max: 25.0, palette: ['blue', 'white', 'red']}, 'GRACE Water Thickness');

// Create a time series chart for GRACE data in Sragen
var TWSaChart = ui.Chart.image.series({
  imageCollection: sragenTWSa.filter(ee.Filter.date(
    '2003-01-01', '2024-12-31')),
  region: sragenGeometry,
  reducer: ee.Reducer.mean(),
  scale: 25000
})
.setOptions({
  title: 'Change in Total Water Storage (TWSa) from GRACE, Sragen',
  hAxis: {title: 'Date', titleTextStyle: {italic: false, bold: true}},
  vAxis: {title: 'TWSa (cm)', titleTextStyle: {italic: false, bold: true}}
});
print(TWSaChart);
```

Fig. 4. GEE Code to load GRACE data for the Study Area during the period 2003-2024

```
// Set start and end years to annualize the data.
var yrStart = 2003;
var yrEnd = 2024;
var years = ee.List.sequence(yrStart, yrEnd);
var GRACE_yr = ee.ImageCollection.fromImages(years.map(function(y) {
  var date = ee.Date.fromYMD(y, 1, 1);
  return sragenTWSa.filter(ee.Filter.calendarRange(y, y,
    'year'))
    .mean()
    .set('system:time_start', date)
    .rename('TWSa');
})).flatten();

// Make plot of annualized TWSa for Sragen Boundary.
var TWSaChart = ui.Chart.image.series({
  imageCollection: GRACE_yr.filter(ee.Filter.date(
    '2003-01-01', '2024-12-31')),
  region: Sragen,
  reducer: ee.Reducer.mean(),
  scale: 25000
}).setChartType('ScatterChart')
.setOptions({
  title: 'Total Annualized Water Storage anomalies',
  trendlines: {
    0: {
      color: 'cc0000'
    }
  },
  hAxis: {
    format: 'MM-yyyy'
  },
  vAxis: {
    title: 'TWSa (cm)'
  },
  lineWidth: 2,
  pointSize: 2
});
print(TWSaChart);
```

Fig. 5. GEE Code for TWSa trend across the full record period for the Study Area

are kg/m². The snow and soil moisture values need to be converted to the corresponding cm of water depth. Map the following conversion variable over the ImageCollection after defining it. These Soil Moisture and Snow Water Equivalents were converted to equivalent water depth units of centimeters and imported from Assets using the code in Fig. 9 and

Fig. 10, respectively.

Importing Surface Water Storage from an Asset to an Image Collection. The JRC Yearly Water Classification History dataset, provided by the Joint Research Centre (JRC) of the European Commission, is a global dataset that maps the extent and changes in surface water over time. It is part of

the Global Surface Water (GSW) dataset derived from Landsat satellite imagery. This dataset is particularly useful for studying long-term trends in surface water dynamics, including seasonal and permanent water bodies.

Unlike the other components of water storage, land surface models do not include surface water storage. JRC: Yearly Water Classification History, v1.4, is the source of SWa instead. Band: 'Water-Class,' Resolution: 30 meters, created in the cod script 'Surface_Water-SWa' Fig. 8 before being in the 'Assets' from 2003 until 2021. This dataset contains maps of the location and temporal distribution of surface water from 1984 to 2021 and provides statistics on the extent and change of those water surfaces [41]. Fig. 11 shows the GEE code used to import these JRC datasets from Assets from 2003 to 2021.

The Yearly Seasonality Classification collection for the study area contains a year-by-year classification of the seasonality of water based on the occurrence values detected throughout the period Fig. 12.

Combining Image Collections to Resolve Changes in Groundwater. Unfortunately, it's still hard to quantify change without having all the variables on one plot. It might be best to compute the differences via Eq.1. In this case, many image collections are combined, and differences are calculated using an expression. The GLDAS image collections were first combined. To do this, the "ee.Join.inner" function is used. Calculate the change in water that is accessible to humans by using GLDAS and GRACE data. Print out the ImageCollection GRACE_res_GLDAS for a moment. One can rearrange Eq. 1 to solve for GWa in order to resolve changes in groundwater storage in the basin. Here, we disregard canopy storage anomalies in the equation below Eq. 2 since we believe they are negligible in comparison to other storage components. This phase is carried out by creating a new variable called GWa by mapping an expression across an ImageCollection.

Fig. 13 shows that GLDAS image collections for soil moisture (SM) and snow water equivalent (SWE)

```
// Set start / end year.
var yrStart = 2003;
var yrEnd = 2024;
var years = ee.List.sequence(yrStart, yrEnd);

// The varBand variable is set to evaluated Soil Moisture.
// Need to adjust to export Soil Moisture (SM_inst)
var varBand = 'RootMoist_inst';

var waterstorage = ee.ImageCollection('NASA/GLDAS/V021/NOAH/G025/T3H')
  .select(varBand)
  .filterDate({
    start: ee.Date.fromYMD(yrStart, 1, 1),
    end: ee.Date.fromYMD(yrEnd, 12, 1)
  });
var waterstorage_mean = waterstorage.select(varBand).mean();
print(waterstorage_mean);

var y = 2024;
var date = ee.Date.fromYMD(y, 1, 1);

var waterstorageIC = ee.Image(ee.ImageCollection(
  'NASA/GLDAS/V021/NOAH/G025/T3H')
  .select(varBand)
  .filter(ee.Filter.calendarRange(y, y, 'year'))
  .mean());
print(waterstorageIC);

var waterstorage_out = ee.Image(waterstorageIC.subtract(
  waterstorage_mean)
  .set('year', y)
  .set('system:time_start', date));
print(waterstorage_out);

// Change the assetId & description below to reflect the variable being exported.
// These should be changed to reflect SM, SWE, Can etc.

Export.image.toAsset({
  image: waterstorage_out,
  description: 'sm2024',
  assetId: 'sm2024',
  region: Sragen,
  scale: 10000,
  maxPixels: 1e13
});
```

Fig. 6. GEE Code to load and convert three-hourly GLDAS Soil Moisture to annual SMA for 2003 until 2024

```
// Set start / end year.
var yrStart = 2003;
var yrEnd = 2022;
var years = ee.List.sequence(yrStart, yrEnd);

// Import the JRC Global Surface Water dataset
var jrcSurfaceWater = ee.ImageCollection("JRC/GSW1_4/YearlyHistory");

var visualization = {
  bands: ['waterClass'],
  min: 0.0,
  max: 3.0,
  palette: ['cccccc', 'ffffff', '99d9ea', '0000ff']
};

// The varBand variable is set to evaluated Surface Water.
// Need to adjust to export Surface Water (waterClass)
var varBand = 'waterClass';

var waterStorage = ee.ImageCollection('JRC/GSW1_4/YearlyHistory')
  .select(varBand)
  .filterDate({
    start: ee.Date.fromYMD(yrStart, 1, 1),
    end: ee.Date.fromYMD(yrEnd, 12, 1)
  });

var waterStorage_mean = waterStorage.select(varBand).mean();
print(waterStorage_mean);

var y = 2019;
var date = ee.Date.fromYMD(y, 1, 1);

var waterStorageIC = ee.Image(ee.ImageCollection(
  'JRC/GSW1_4/YearlyHistory'
).select('waterClass')
.filter(ee.Filter.calendarRange(y, y, 'year'))
.mean());
print(waterStorageIC);

var waterStorage_out = ee.Image(waterStorageIC.subtract(
  waterStorage_mean
).set('year', y)
.set('system:time_start', date));
print(waterStorage_out);

// Change the assetId & description below to reflect the variable being exported.
// These should be changed to reflect SM, SWE, Can etc.

Export.image.toAsset({
  image: waterStorage_out,
  description: 'sw2019',
  assetId: 'sw2019',
  region: Sragen,
  scale: 10000,
  maxPixels: 1e13
});
```

Fig. 8. GEE Code to load JRC Surface Water seasonality SWa for available data from 2003 until 2021

```
// Set start / end year.
var yrStart = 2003;
var yrEnd = 2024;
var years = ee.List.sequence(yrStart, yrEnd);

// The varBand variable is set to evaluated Snow Water Equivalent.
// Need to adjust to export Snow Water Equivalent (SWE_inst)
var varBand = 'SWE_inst';

var waterStorage = ee.ImageCollection('NASA/GLDAS/V021/NOAH/G025/T3H')
  .select(varBand)
  .filterDate({
    start: ee.Date.fromYMD(yrStart, 1, 1),
    end: ee.Date.fromYMD(yrEnd, 12, 1)
  });

var waterStorage_mean = waterStorage.select(varBand).mean();
print(waterStorage_mean);

var y = 2024;
var date = ee.Date.fromYMD(y, 1, 1);

var waterStorageIC = ee.Image(ee.ImageCollection(
  'NASA/GLDAS/V021/NOAH/G025/T3H'
).select(varBand)
.filter(ee.Filter.calendarRange(y, y, 'year'))
.mean());
print(waterStorageIC);

var waterStorage_out = ee.Image(waterStorageIC.subtract(
  waterStorage_mean
).set('year', y)
.set('system:time_start', date));
print(waterStorage_out);

// Change the assetId & description below to reflect the variable being exported.
// These should be changed to reflect SM, SWE, Can etc.

Export.image.toAsset({
  image: waterStorage_out,
  description: 'swe2024',
  assetId: 'swe2024',
  region: Sragen,
  scale: 10000,
  maxPixels: 1e13
});
```

Fig. 7. GEE Code to load and convert three-hourly GLDAS Snow Water Equivalent to annual SWEa for 2003 until 2024

```
// Load GLDAS Soil Moisture (SM) images from an Asset to an ImageCollection.

var gldas_sm_list = ee.List([sm2003, sm2004, sm2005, sm2006, sm2007,
sm2008, sm2009, sm2010, sm2011, sm2012, sm2013, sm2014, sm2015, sm2016,
sm2017, sm2018, sm2019, sm2020, sm2021, sm2022, sm2023, sm2024
]);
var sm_ic = ee.ImageCollection.fromImages(gldas_sm_list);

// The units for GLDAS are currently showing as kg/m2.
// You can go to Bands to see what the units are for 'RootMoist_inst' and 'SWE_inst'.
// We need to convert the soil moisture and snow values to equivalent water depth units of centimeters.
var kgm2_to_cm = 0.10;
var sm_ic_ts = sm_ic.map(function(img) {
  var date = ee.Date.fromYMD(img.get('year'), 1, 1);
  return img.select('RootMoist_inst').multiply(kgm2_to_cm)
    .rename('SMa').set('system:time_start', date);
});

// Make plot of SMa for Sragen Boundary
var SMaChart = ui.Chart.image.series({
  imageCollection: sm_ic_ts.filter(ee.Filter.date(
    '2003-01-01', '2024-12-31')),
  region: sragenGeometry,
  reducer: ee.Reducer.mean(),
  scale: 25000
})
.setChartType('ScatterChart')
.setOptions({
  title: 'Soil Moisture anomalies',
  trendlines: {
    0: {
      color: 'CC0000'
    }
  },
  hAxis: {
    format: 'MM-yyyy'
  },
  vAxis: {
    title: 'SMa (cm)'
  },
  lineWidth: 2,
  pointSize: 2
});
print(SMaChart);
```

Fig. 9. GEE Code to Import SM from Assets and convert the value to cm

```
// Load GLDAS Snow Water Equivalent (SWE) Images from an Asset to an Image Collection

var gldas_swe_list = ee.List([swe2003, swe2004, swe2005, swe2006,
swe2007, swe2008, swe2009, swe2010, swe2011, swe2012,
swe2013, swe2014, swe2015, swe2016, swe2017, swe2018, swe2019,
swe2020, swe2021, swe2022, swe2023, swe2024
]);
var swe_ic = ee.ImageCollection.fromImages(gldas_swe_list);

var swe_ic_ts = swe_ic.map(function(img) {
  var date = ee.Date.fromYMD(img.get('year'), 1, 1);
  return img.select('SWE_inst').multiply(kgm2_to_cm).rename(
    'SWEa').set('system:time_start', date);
});

// Make plot of SWEa for Sragen Boundary
var SWEaChart = ui.Chart.image.series({
  imageCollection: swe_ic_ts.filter(ee.Filter.date(
    '2003-01-01', '2024-12-31')),
  region: sragenGeometry,
  reducer: ee.Reducer.mean(),
  scale: 25000
})
.setChartType('ScatterChart')
.setOptions({
  title: 'Snow Water Equivalent anomalies',
  trendlines: {
    0: {
      color: 'CC0000'
    }
  },
  hAxis: {
    format: 'MM-yyyy'
  },
  vAxis: {
    title: 'SWEa (cm)'
  },
  lineWidth: 2,
  pointSize: 2
});
print(SWEaChart);
```

Fig. 10. GEE Code to Import SWE from an Assets and convert the value to cm


```

// Load Surface Water (SW) images from an Asset to an ImageCollection.
var JRC_sw_list = ee.List([sw2003, sw2004, sw2005, sw2006, sw2007,
    sw2008, sw2009, sw2010, sw2011, sw2012, sw2013, sw2014,
    sw2015, sw2016, sw2017, sw2018, sw2019, sw2020, sw2021
]);

var sw_ic = ee.ImageCollection.fromImages(JRC_sw_list);
var kgm2_to_cm = 0.10;
var sw_ic_ts = sw_ic.map(function(img) {
    var date = ee.Date.fromYMD(img.get('year'), 1, 1);
    return img.select('waterClass').multiply(kgm2_to_cm)
        .rename('SWa').set('system:time_start', date);
});

var dataset = ee.ImageCollection('JRC/GSW1_4/YearlyHistory');

var visualization = {
    bands: ['waterClass'],
    min: 0.0,
    max: 3.0,
    palette: ['cccccc', 'ffffff', '99d9ea', '0000ff']
};

Map.addLayer(dataset, visualization, 'Water Class');

// Make plot of SMA for Basin Boundary
var SWaChart = ui.Chart.image.series({
    imageCollection: sw_ic_ts.filter(ee.Filter.date(
        '2003-01-01', '2021-12-31')),
    region: srageGeometry,
    reducer: ee.Reducer.mean(),
    scale: 25000
})
.setChartType('ScatterChart')
.setOptions({
    title: 'Surface Water anomalies',
    trendlines: {
        0: {
            color: 'CC0000'
        }
    },
    hAxis: {
        format: 'MM-yyyy'
    },
    vAxis: {
        title: 'SWa (%)'
    },
    lineWidth: 2,
    pointSize: 2
});
print(SWaChart);

```

Fig. 11. GEE code used to import these JRC SWa datasets from Assets during the period 2003 – 2021

are combined using the `ee.Join.inner` function to ensure temporal and spatial alignment. These datasets are merged with surface water (SW) from JRC image collections. Then, GRACE-derived terrestrial water storage (TWS) anomalies are merged, representing the total water storage changes. Groundwater storage anomalies (Gwa) are isolated by rearranging the water balance equation Eq.2.

$$Gwa = TWSa - SWa - SMA - SWEa \quad (2)$$

Where:

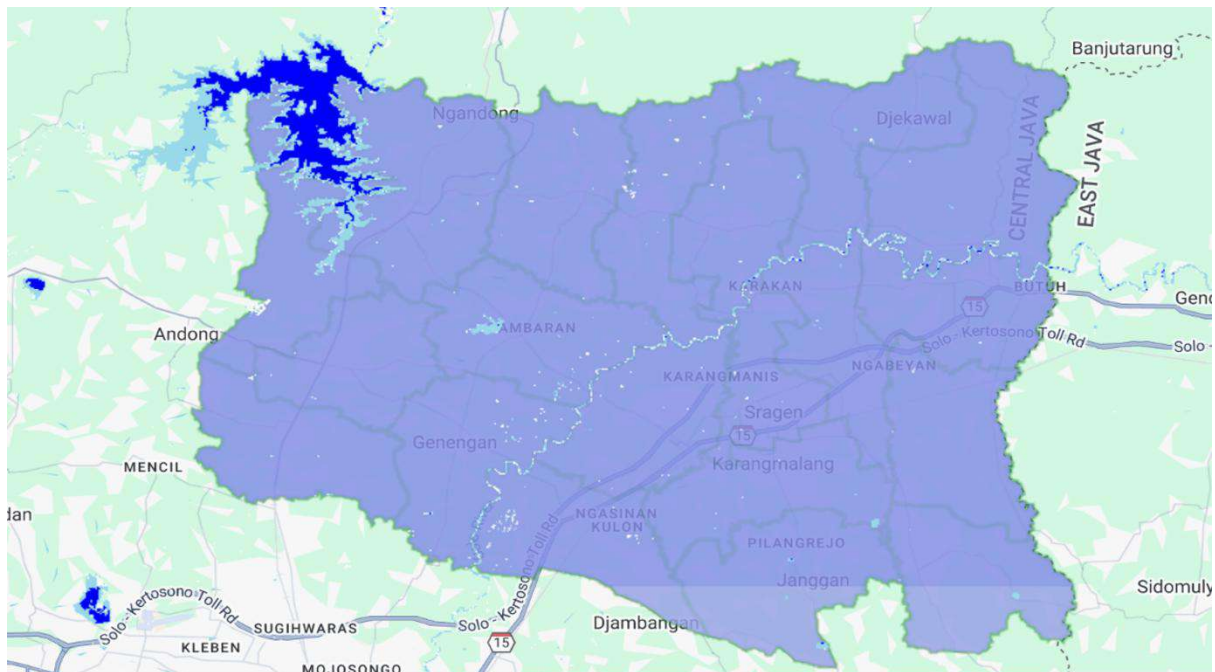
TWSa = Terrestrial Water Storage anomaly
(from GRACE)

SWa = Surface Water anomaly (from JRC)

SMA = Soil Moisture anomaly (from GLDAS)

SWEa = Snow Water Equivalent anomaly
(from GLDAS)

This equation is applied across the combined image collection using GEE's `map` function, generating a new variable, Gwa, that represents monthly groundwater storage changes. The results are visualized and analyzed to assess seasonal and long-term trends in groundwater storage. Also, during the drought period 2015 – 2016, the groundwater depletion and water losses were calculated using the GEE code shown in Fig. 14.



Class Table: waterClass

Value	Color	Color Value	Description
0		#cccccc	No data
1		#ffffff	Not water
2		#99d9ea	Seasonal water
3		#0000ff	Permanent water

Fig. 12. Classification of the Seasonality of Surface water in the study area

By leveraging the strengths of GRACE and GLDAS datasets, this methodology offers a robust framework for detecting groundwater storage changes. The integration of these datasets enables the separation of groundwater anomalies from other hydrological components, facilitating accurate monitoring of groundwater dynamics. This approach is particularly valuable for regions facing water scarcity, as it supports informed decision-making and sustainable water management practices.

3. Results And Discussion

Total Water Storage Changes in the study area with GRACE. The imported GRACE data has already been processed to provide TWSa units. In this dataset, the anomalies are measured in "equivalent water thickness" units. With GRACE, the gravitational attraction of merely water is not directly observed. Hence, GRACE hydrologic data are given as anomalies. Earth's surface (such as mountains) is also included in the observed gravity.

Changes concerning a longer-term mean gravity signal can be used to decipher the water signal. The anomalies show the variation between a multi-year mean and an observation from a specific month. Fig. 15 shows the monthly TWSa for the study area from '2003-01-01' to '2024-12-31'.

Fig. 15 illustrates the temporal variation in Total Water Storage Anomaly (TWSa) derived from GRACE data in the Sragen region from 2003 to 2024. The y-axis represents TWSa in centimeters (cm), indicating deviations from the long-term average water storage, with positive values denoting an increase and negative values indicating a decrease. The x-axis spans the study period, showing monthly or annual changes in water storage. The line connecting the data points reveals fluctuations in TWSa, with peaks corresponding to periods of increased water storage and troughs reflecting decreased storage. Over the observed period, the trend analysis suggests a net decline in water storage, potentially attributed to factors such as ground-

```

// Combine GLDAS & GRACE Data to compute change in human accessible water
var filter = ee.Filter.equals({
  leftField: 'system:time_start',
  rightField: 'system:time_start'
});
// Create the join.
var joindata = ee.Join.inner();
// Join GLDAS data
var firstJoin = ee.ImageCollection(joindata.apply(swe_ic_ts, sm_ic_ts,
  filter));
var join_1 = firstJoin.map(function(feature) {
  return ee.Image.cat(feature.get('primary'), feature.get(
    'secondary'));
});
print('Joined', join_1);

// Repeat to append SW Data now
var secondJoin = ee.ImageCollection(joindata.apply(join_1, sw_ic_ts,
  filter));
var sragen_GLDAS = secondJoin.map(function(feature) {
  return ee.Image.cat(feature.get('primary'), feature.get(
    'secondary'));
});

// Repeat to append GRACE now
var thirdJoin = ee.ImageCollection(joindata.apply(sragen_GLDAS, GRACE_yr,
  filter));
var GRACE_sragen_GLDAS = thirdJoin.map(function(feature) {
  return ee.Image.cat(feature.get('primary'), feature.get(
    'secondary'));
});

// Compute groundwater storage anomalies
var Gwa = ee.ImageCollection(GRACE_sragen_GLDAS.map(function(img) {
  var date = ee.Date.fromYMD(img.get('year'), 1, 1);
  return img.expression(
    'TWSa - SWa - SMa - SWEa', {
      'TWSa': img.select('TWSa'),
      'SMa': img.select('SMa'),
      'SWa': img.select('SWa'),
      'SWEa': img.select('SWEa')
    }).rename('Gwa').copyProperties(img, [
      'system:time_start'
    ]);
}));
print('Gwa', Gwa);

```

Fig. 13. GEE Code used to Combining Image Collections to Resolve Changes in Groundwater

water over-extraction, reduced precipitation, or unsustainable water management practices. This decline highlights the region's vulnerability to water scarcity and underscores the need for sustainable water resource management strategies.

This analysis is significant because it provides critical insights into the hydrological dynamics of Sragen Regency. By quantifying changes in total water storage, the chart helps assess the impacts of climate variability and human activities on the region's water resources. These findings are essential for informing policy decisions and developing adaptive water management practices to address the region's ongoing and future water challenges.

The interannual and seasonal fluctuations in TWSa are depicted in Fig. 16. Since reservoirs are full and the soil is wet, the winter months reveal times when water storage is at its highest. Less TWSa is

visible in the summer and early fall since the soil is drying out and the reservoir water has been consumed. Furthermore, throughout the summer, groundwater is drawn up and used to augment a finite supply of surface water. Declining TWSa between 2017–2018 and 2022–2024 provided evidence of drought.

Changes in Soil Water Storage in the Study Area with GLDAS. Fig. 17 shows Soil Moisture SMa. Notice that SMa is like TWSa but is slightly out of phase with TWSa, which shows the temporal variations in soil moisture levels, expressed as anomalies (SMa), from January 2003 to December 2024. The y-axis represents the deviation from the long-term average soil moisture, with positive values indicating wetter-than-average conditions and negative values reflecting drier-than-average conditions. The x-axis tracks time in monthly increments, allowing for the

```
// Chart Results
var GwaChart = ui.Chart.image.series({
  imageCollection: Gwa.filter(ee.Filter.date('2003-01-01',
    '2021-12-31')),
  region: sragenGeometry,
  reducer: ee.Reducer.mean(),
  scale: 25000
})
.setChartType('ScatterChart')
.setOptions({
  title: 'Changes in Groundwater Storage',
  trendlines: {
    0: {
      color: 'CC0000'
    }
  },
  hAxis: {
    format: 'MM-yyyy'
  },
  vAxis: {
    title: 'Gwa (cm)'
  },
  lineWidth: 2,
  pointSize: 2
});
print(GwaChart);

// Now look at the values from the start of 2015 to the end of 2016 drought.
// 2015 9.606 cm --> 2016 6.079 cm
// This is a ~3.5 cm / 100000 (cm/km) * Area 997 km2 =
var loss_km3 = ee.Number(9.606).subtract(6.079).divide(km_2_cm)
.multiply(area_km2);
print('During the 2015-2016 drought, CA lost ', loss_km3,
  'km3 in groundwater');
```

Fig. 14. GEE Code used to show and calculate water losses during 2015 – 2016

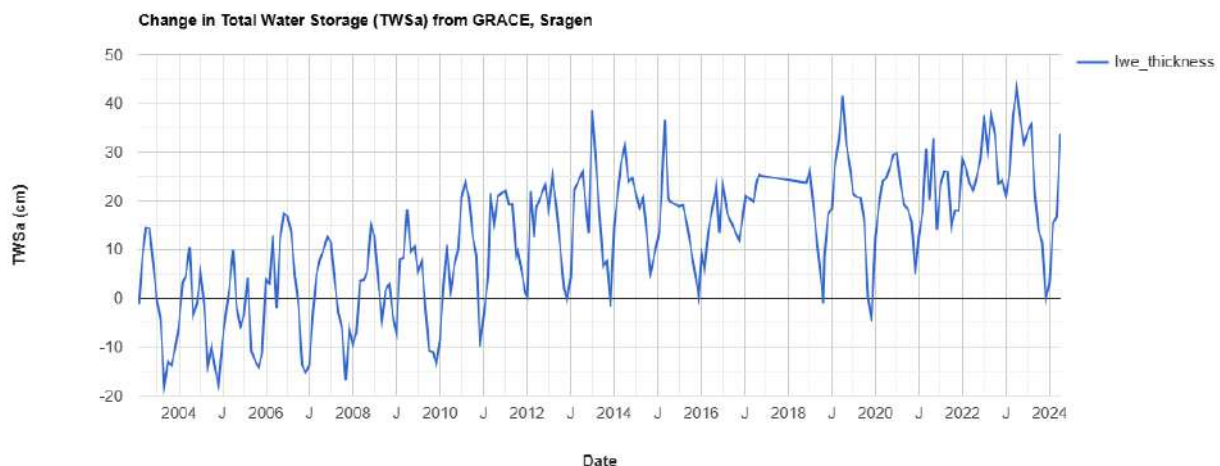


Fig. 15. Monthly TWSa for the Study Area

observation of seasonal and interannual trends. The line plot reveals fluctuations in soil moisture, with notable peaks and troughs corresponding to increased or decreased moisture availability. These variations are critical for understanding the hydrological and agricultural dynamics of the region, as soil moisture anomalies influence crop yields, water resource availability, and ecosystem health. The overall trend in the data can provide insights into

the impacts of climate variability, land use changes, and water management practices, making this chart an essential tool for informing sustainable agricultural and environmental strategies.

Changes in Snow Water Equivalent in the Study Area with GLDAS. Fig. 18 shows Snow Water Equivalent SWEa, which may be noticed in the fact that SWEa has a much smaller (absent) magnitude than the other two variables. Fig. 18 il-

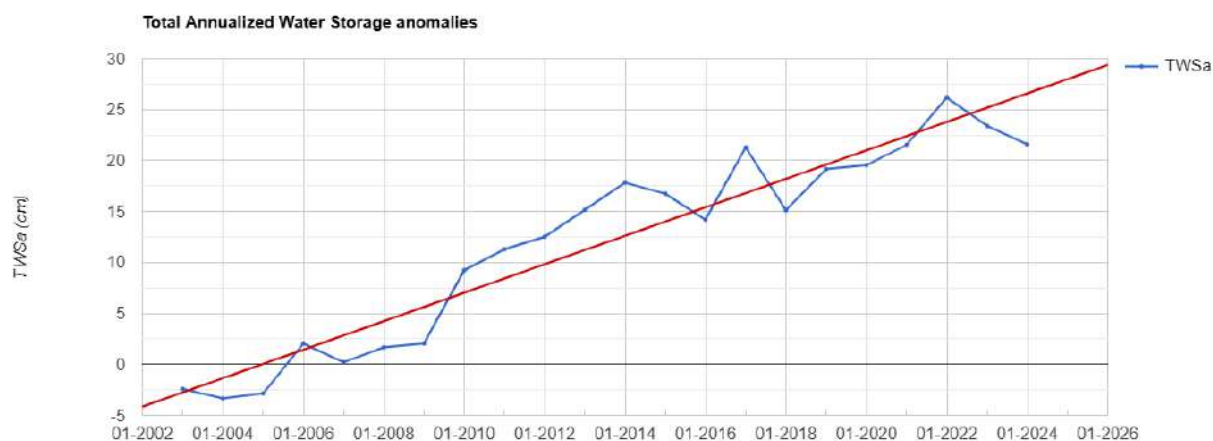


Fig. 16. Total Annualized Water Storage anomalies



Fig. 17. Time-series charts of SMA in units of equivalent water height (centimeters)

illustrates the temporal variations in snow water equivalent, expressed as anomalies, from January 2003 to December 2024. The y-axis represents deviations from the long-term average snow water equivalent, with positive values indicating above-average snow accumulation and negative values reflecting below-average conditions. However, in the study area, there is no snow throughout the year, as noted in the consistent absence of significant anomalies in the data. This absence of snow is consistent with the region's climatic conditions, which do not support snowfall or snow accumulation. Consequently, the chart underscores the irrelevance of snow water equivalent as a hydrological variable in this context, highlighting the need to focus on other critical water storage components, such as soil moisture and groundwater, to understand the region's water dynamics and inform sustainable water management practices.

Changes in Surface Water SWa in the Study Area with GLDAS. Fig. 19 shows surface water anomalies (SWa), which indicates the time variation in surface water level anomalies between January 2003 and January 2021. The y-axis denotes

deviation from the long-term average surface water storage. Positive values indicate above-average water levels, while negative values indicate below-average conditions. The x-axis measures time in months and shows seasonal and interannual fluctuations in surface water availability.

Fig. 19 shows that surface water anomalies SWa are of a similar magnitude to soil moisture anomalies SMa. As expected, SWa increases during each wet period in Sragen Regency (2009–2010 and 2011–2013) aligns with the hydrological behavior. During wet periods, increased precipitation typically leads to higher surface water levels, resulting in positive anomalies, as the chart depicts. The observed increases in SWa during these periods suggest that water inputs from rainfall and other sources exceed water use and losses, leading to a net gain in surface water storage. This pattern is consistent with the natural hydrological cycle, where wet periods replenish surface water reservoirs. Such anomalies are important because they signify the effect of precipitation patterns, evaporation rates, and human activities, such as water extraction and land use changes, on the hydrological



Fig. 18. Time-series charts of SWEa in units of equivalent water height (centimeters)

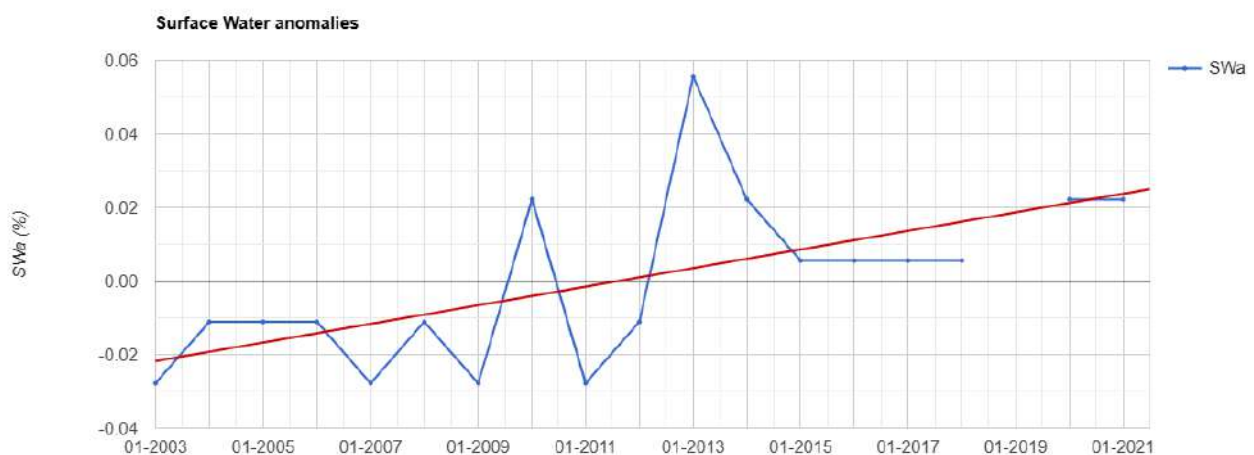


Fig. 19. Time-series chart of SWa in units of equivalent water height (%)

dynamics of the study area. Trends and variations in surface water anomalies can be used to give interpretable information about regional water resource variability and management strategies for sustainable water consumption and adaptation to climate change. This aspect of data is very significant when assessing the resistance of surface water

systems toward climatic extremes and anthropogenic pressures in a bid to establish the sustainability of water for ecosystems and human needs.

Changes in Groundwater Storage for the Study Area. Fig. 20 shows the changes in groundwater storage anomalies (GWA) in Sragen Regency from 2003 to 2021, derived using GRACE and



Fig. 20. Time-series chart of GWA in units of equivalent water height (centimeters)

GLDAS data. The y-axis represents groundwater storage anomalies in centimeters (cm), indicating deviations from the long-term average, while the x-axis shows the timeline in monthly increments. The fluctuations in the line reflect seasonal and interannual variations in groundwater storage, with positive values indicating periods of groundwater recharge and negative values suggesting depletion.

This groundwater depletion observed in Sragen Regency aligns with findings from other regions experiencing similar challenges. Studies in areas such as the North China Plain, the Ganges-Brahmaputra basin in India, and California's Central Valley have also reported significant groundwater decline due to over-extraction, climate variability, and insufficient recharge [7, 11, 22, 42]. For instance, Tiwari et al. [10] documented alarming groundwater depletion rates in northern India, attributing the decline primarily to excessive agricultural water use. Famiglietti et al. [15] highlighted the role of unsustainable groundwater extraction in California's Central Valley, leading to long-term declines in groundwater storage. Similarly, Wada et al. [43] reported significant groundwater depletion in the Middle East and North Africa due to over-extraction and limited recharge.

The seasonal fluctuations in groundwater storage in Sragen Regency, driven by monsoon patterns, mirror trends observed in the High Plains Aquifer in the U.S. [16], where wet and dry season variability significantly affects water availability. Furthermore, the drought-induced declines in Sragen Regency during 2015–2016 are comparable to patterns seen in the Colorado River Basin [17], emphasizing the critical need for adaptive water management strategies such as managed aquifer recharge and improved irrigation practices. These comparisons underscore the global nature of groundwater depletion and the urgency for sustainable interventions to address water scarcity issues.

Key Observations

1. **Seasonal Variability:** The chart reveals pronounced seasonal fluctuations in groundwater storage, consistent with the region's monsoon-driven climate. Peaks in groundwater storage typically coincide with wet seasons, while troughs align with dry periods. This pattern is consistent with findings from other regions with similar climatic conditions, such as Rodell et al. [19], who observed strong seasonal signals in groundwater storage in the Ganges-Brahmaputra basin. Similarly, in California's Central Valley, excessive irrigation practices have resulted in significant water table declines [15].
2. **Long-Term Trends:** A gradual decline in groundwater storage is evident over the

study period, particularly after 2010. This trend aligns with studies in other groundwater-dependent regions, such as the North China Plain [10], the High Plains Aquifer in the U.S. [16], and in the South and Southeast Asian Countries [12], where over-extraction for agriculture and urbanization has led to significant groundwater depletion.

3. **Anomalies and Extreme Events:** Sharp declines in groundwater storage, such as those observed around 2015 and 2019, may correspond to prolonged droughts or increased water demand. Similar anomalies have been documented in regions like India, where groundwater depletion has been exacerbated by erratic rainfall and intensive irrigation [18].

Implications for Water Management

The observed decline in groundwater storage underscores the urgent need for sustainable water management practices in the Sragen Regency, a critical step toward achieving SDG 6.3 (improving water quality and reducing water scarcity). Strategies such as managed aquifer recharge, improved irrigation efficiency, and regulatory measures to limit groundwater extraction could mitigate further depletion, align with SDG 6.4 (ensuring sustainable withdrawals) and could mitigate further depletion [9]. These findings align with recommendations from studies in similar contexts, such as those by Gleeson et al. [44], who emphasized the importance of integrated water resource management to address groundwater sustainability.

4. Conclusion

The study utilized the GRACE satellite data with GLDAS and Joint Research Centre datasets to investigate groundwater storage changes in the Google Earth Engine platform in the Sragen Regency, Central Java, Indonesia. Results indicated serious declines in total water storage, especially during periods of drought from 2015 to 2016 and in 2019, which were facilitated by over-extraction, decreased precipitation, and unsustainable water management. Soil moisture dynamics were seasonal, while snow water equivalent varied a negligible amount in the region with a tropical climate. Surface water levels showed seasonal variation with increasing stress from climate variability and human activities.

The most important finding is the long-term decline in groundwater storage, especially post-2010, with seasonal recharge during wet spells and depletion during warmer drought periods. The trend fits within the common narrative of global groundwater depletion patterns in agriculture and urban areas. This study highlights the need for sustainable water management practices such as

managed aquifer recharge systems, better irrigation efficiency, and regulatory measures to control groundwater extraction, contributing directly to SDG 6 (Clean Water and Sanitation) and SDG 13 (Climate Action). Implementing these strategies will ensure water security for vulnerable populations and ecosystems, advancing the 2030 Agenda for Sustainable Development.

While the study provides valuable insights, limitations like GRACE's coarse resolution and reliance on supplementary datasets suggest the need

for future research with higher-resolution data and advanced models. In conclusion, this research underscores the importance of monitoring groundwater changes and implementing sustainable water management strategies to ensure water security in the Sragen Regency amid climate change and increasing demand.

ACKNOWLEDGMENT

The authors acknowledge the Universitas Sebelas Maret, Indonesia for providing Master Scholarship for Mr. Najm Al-Deen Moneer Hilal so this study can be accomplished.

References

- 1 Ramdhani, M. Z., Arifianto, F., & Giarno, G. (2023). Perbandingan Standardized Precipitation Index dan Standardized Anomaly Index untuk Penentuan Tingkat Kekeringan di Kabupaten Sragen, Jawa Tengah. *Semesta Teknika*, 26(1), 86-96. DOI: <https://doi.org/10.18196/st.v26i1.16310>
- 2 Choir, M. N. A. (2023). Tujuh Kecamatan di Sragen Terdampak Kekeringan. *Republika Newspaper*. <https://rejogja.republika.co.id/berita/s0wus7291/tujuh-kecamatan-di-sragen-terdampak-kekeringan> (accessed Feb. 12, 2025)
- 3 Susetyo, P.D. (2023). Kekeringan dan Kecukupan Luas Tutupan Hutan. *Kompas Newspaper*. <https://les-tari.kompas.com/read/2023/08/07/101409386/kekeringan-dan-kecukupan-luas-tutupan-hutan?page=all> (accessed Feb. 12, 2025)
- 4] Basuki, T.M., Indrawati, D.R., Nugroho, H.Y.S.H., Pramono, I.B., Setiawan, O., Nugroho, N.P., Maftukhakh, F., Nada, H., Nandini, R., Savitri, E., Adi, R.N. (2024). Water Pollution of Some Major Rivers in Indonesia: the status, institution, regulation, and recommendation for its mitigation. *Polish Journal of Environmental Studies*, 33(4), 3515-3530. DOI: <https://doi.org/10.15244/pjoes/178532>
- 5 Prajoko, S., Ismawati, R. (2018). Water feasibility study of Bengawan Solo River for irrigation: the need for technology to solve rice field pollution in Sragen, Indonesia. *International Journal of Applied Biology*, 2(1), 12-21. <https://journal.unhas.ac.id/index.php/ijoab/article/view/3971>
- 6 Yanuarto, T. (2020). Sragen Kekeringan Saat Beberapa Wilayah Lain Alami Banjir. *Badan Nasional Penanggulangan Bencana BNPB*. <https://bnpb.go.id/berita/sragen-kekeringan-saat-beberapa-wilayah-lain-alami-banjir> (accessed Feb. 13, 2025)
- 7 Han, Y., Zuo, D., Xu, Z., Wang, G., Peng, D., Pang, B., Yang, H. (2022). Attributing the impacts of vegetation and climate changes on the spatial heterogeneity of terrestrial water storage over the Tibetan Plateau. *Remote Sensing*, 15(1), 117. DOI: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4206918>
- 8 Pribilova, V. M. (2013). Underground water resources of Kharkiv region and strategy of their use for water supply of the population. *Visnyk of VN Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, 38(1049), 37-44. <https://periodicals.karazin.ua/geoeco/article/view/7666>
- 9 UNDP, United Nations Development Program. (2017). Sustainable Development Goals: Ukraine. Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine. https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/migration/ua/SDGs_NationalReportEN_Web.pdf. (accessed Feb. 13, 2025)
- 10 Tiwari, V. M., Wahr, J., Swenson, S. (2009). Dwindling groundwater resources in northern India, from satellite gravity observations. *Geophysical Research Letters*, 36(18), 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1029/2009GL039401>
- 11 Purdy, A. J., David, C. H., Sikder, M. S., Reager, J. T., Chandanpurkar, H. A., Jones, N. L., Matin, M. A. (2019). An open-source tool to facilitate the processing of GRACE observations and GLDAS outputs: An evaluation in Bangladesh. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 155. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00155>
- 12 Gupta, M., Chinnasamy, P. (2022). Trends in groundwater research development in the South and Southeast Asian Countries: a 50-year bibliometric analysis (1970–2020). *Environmental Science and Pollution Research*, 29(50), 75271-75292. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21163-4>
- 13 Nigatu, Z. M., Fan, D., You, W. (2021). GRACE products and land surface models for estimating the changes in key water storage components in the Nile River Basin. *Advances in Space Research*, 67(6), 1896-1913. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.12.042>
- 14 Voss, K. A., Famiglietti, J. S., Lo, M., De Linage, C., Rodell, M., Swenson, S. C. (2013). Groundwater depletion in the Middle East from GRACE with implications for transboundary water management in the Tigris-Euphrates-Western Iran region. *Water resources research*, 49(2), 904-914. DOI: <https://doi.org/10.1002/wrcr.20078>
- 15 Famiglietti, J. S., Lo, M., Ho, S. L., Bethune, J., Anderson, K. J., Syed, T. H., Swenson, S. C., de Linage, C. R., Rodell, M. (2011). Satellites measure recent rates of groundwater depletion in California's Central Valley. *Geophysical Research Letters*, 38, L03403. DOI: <https://doi.org/10.1029/2010GL046442>
- 16 Scanlon, B. R., Faunt, C. C., Longuevergne, L., Reedy, R. C., Alley, W. M., McGuire, V. L., McMahon, P. B. (2012). Groundwater depletion and sustainability of irrigation in the US High Plains and Central Valley. *Proceedings of the national academy of sciences*, 109(24), 9320-9325. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1200311109>

- 17 Castle, S. L., Thomas, B. F., Reager, J. T., Rodell, M., Swenson, S. C., Famiglietti, J. S. (2014). Groundwater depletion during drought threatens future water security of the Colorado River Basin. *Geophysical research letters*, 41(16), 5904-5911. DOI: <https://doi.org/10.1002/2014GL061055>
- 18 Asoka, A., Gleeson, T., Wada, Y., Mishra, V. (2017). Relative contribution of monsoon precipitation and pumping to changes in groundwater storage in India. *Nature Geoscience*, 10(2), 109-117. DOI: <https://doi.org/10.1038/ngeo2869>
- 19 Rodell, M., Velicogna, I., Famiglietti, J. S. (2009). Satellite-based estimates of groundwater depletion in India. *Nature*, 460(7258), 999-1002. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature08238>
- 20 Richey, A. S., Thomas, B. F., Lo, M. H., Famiglietti, J. S., Swenson, S., Rodell, M. (2015). Uncertainty in global groundwater storage estimates in a Total Groundwater Stress framework. *Water resources research*, 51(7), 5198-5216. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1969.tb04897.x>
- 21 Almeida, F. G. V. D., Calmant, S., Seyler, F., Ramillien, G., Blitzkow, D., Matos, A. C. C., Silva, J. S. (2012). Time-variations of equivalent water heights' from Grace Mission and in-situ river stages in the Amazon basin. *Acta Amazonica*, 42, 125-134. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0044-59672012000100015>
- 22 Frappart, F., Ramillien, G. (2018). Monitoring groundwater storage changes using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellite mission: A review. *Remote Sensing*, 10(6), 829. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10060829>
- 23 Herman, J. (2012). Balancing, turning, saving special AOCs operations to extend the GRACE mission. In *SpaceOps 2012* (p. 1275114). DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2012-1275114>
- 24 Nie, Y., Shen, Y., Chen, Q. (2019). Combination analysis of future polar-type gravity mission and GRACE Follow-On. *Remote sensing*, 11(2), 200. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11020200>
- 25 Su, X., Guo, J., Shum, C. K., Luo, Z., Zhang, Y. (2020). Increased low degree spherical harmonic influences on polar ice sheet mass change derived from GRACE mission. *Remote Sensing*, 12(24), 4178. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12244178>
- 26 Flechtner, F., Webb, F., Landerer, F., Dahle, C., Watkins, M., Morton, P., Save, H. (2019, January). GRACE Follow-On: mission status and first mass change observations. In *Geophysical Research Abstracts* (Vol. 21).
- 27 Adhikari, S., Ivins, E. R., Frederikse, T., Landerer, F. W., Caron, L. (2019). Sea-level fingerprints emergent from GRACE mission data. *Earth System Science Data*, 11(2), 629-646. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-11-629-2019>
- 28 Godah, W., Szelachowska, M., Krynski, J., Ray, J. D. (2020). Assessment of temporal variations of orthometric/normal heights induced by hydrological mass variations over large river basins using GRACE mission data. *Remote sensing*, 12(18), 3070. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12183070>
- 29 Syed, T. H., Famiglietti, J. S., Rodell, M., Chen, J., Wilson, C. R. (2008). Analysis of terrestrial water storage changes from GRACE and GLDAS. *Water Resources Research*, 44(2). DOI: <https://doi.org/10.1029/2006WR005779>
- 30 Riegger, J., Tourian, M. J. (2014). Characterization of runoff-storage relationships by satellite gravimetry and remote sensing. *Water Resources Research*, 50(4), 3444-3466. DOI: <https://doi.org/10.1002/2013WR013847>
- 31 Sproles, E. A., Leibowitz, S. G., Reager, J. T., Wigington Jr, P. J., Famiglietti, J. S., Patil, S. D. (2015). GRACE storage-runoff hystereses reveal the dynamics of regional watersheds. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(7), 3253-3272. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-19-3253-2015>
- 32 Long, D., Longuevergne, L., Scanlon, B. R. (2015). Global analysis of approaches for deriving total water storage changes from GRACE satellites. *Water Resources Research*, 51(4), 2574-2594. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1969.tb04897.x>
- 33 Billah, M. M., Goodall, J. L., Narayan, U., Reager, J. T., Lakshmi, V., Famiglietti, J. S. (2015). A methodology for evaluating evapotranspiration estimates at the watershed-scale using GRACE. *Journal of Hydrology*, 523, 574-586. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.066>
- 34 Tapley, B. D., Bettadpur, S., Ries, J. C., Thompson, P. F., Watkins, M. M. (2004). GRACE measurements of mass variability in the Earth system. *Science*, 305(5683), 503-505. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1099192>
- 35 Famiglietti, J. S. (2014). The global groundwater crisis. *Nature climate change*, 4(11), 945-948. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate2425>
- 36 Lykhovyd, P. (2023). Remote sensing data for drought stress and croplands productivity assessment in Kherson region. *Visnyk of VN Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (59), 166-177. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-12>
- 37 Shukla, M., Maurya, V., Dwivedi, R. (2021). Groundwater monitoring using grace mission. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43, 425-430. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2021-425-2021>
- 38 NASA. (2023). Tracking groundwater changes around the world. California Institute of Technology. <https://grace.jpl.nasa.gov/applications/groundwater/> (accessed Feb. 20, 2025)
- 39 Badan Pusat Statistik Kabupaten Sragen. (2024) KABUPATEN SRAGEN DALAM ANGKA 2024. <https://sragenkab.bps.go.id/id/publication/2024/02/28/e01f958a1e2e72be248d229c/kabupaten-sragen-dalam-angka-2024.html>
- 40 Rodell, M., Houser, P. R., Jambor, U. E. A., Gottschalk, J., Mitchell, K., Meng, C. J., Arsenault, K., Cosgrove, B., Radakovich, J., Bosilovich, M., Entin, J.K., Walker, J.P., Lohmann, D., Toll, D. (2004). The global land data assimilation system. *Bulletin of the American Meteorological society*, 85(3), 381-394. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-85-3-381>

- 41 Pekel, J. F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633), 418-422. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature20584>
- 42 Liu, J., Jiang, L., Zhang, X., Druce, D., Kittel, C. M., Tøttrup, C., Bauer-Gottwein, P. (2021). Impacts of water resources management on land water storage in the North China Plain: Insights from multi-mission earth observations. *Journal of Hydrology*, 603, 126933. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126933>
- 43 Wada, Y., Van Beek, L. P., Van Kempen, C. M., Reckman, J. W., Vasak, S., Bierkens, M. F. (2010). Global depletion of groundwater resources. *Geophysical research letters*, 37(20). DOI: <https://doi.org/10.1029/2010GL044571>
- 44 Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M. F., Van Beek, L. P. (2012). Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*, 488(7410), 197-200. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature11295>

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Моніторинг змін у запасах підземних вод за допомогою супутникової місії Експеримент з Відновлення Гравітації та Клімату (GRACE): тематичне дослідження округу Сраген, Індонезія

*Наджм Аль-Дін Монер Хіلال*¹

Магістерська програма з наук про навколишнє середовище,

¹ Університет Себелас Марет, Суракарта, Індонезія;

*Комарія*¹

д. філософії, магістерська програма з наук про навколишнє середовище;

*Арі Хандоно Рамелан*¹

професор викладач, магістерська програма з наук про навколишнє середовище;

*Кейро Нода*²

доцент, Вища школа сільськогосподарських та біологічних наук,

² Токійський університет, Токіо, Японія

Підземні води є важливим ресурсом для сільського господарства, питної води та екосистем у регентстві Сраген, Центральна Ява, Індонезія. Однак, цей район значно страждає від водного стресу через періодичні посухи, забруднення та нестійкі методи видобутку. Метою цього дослідження є моніторинг змін запасів підземних вод протягом 2003-2024 років за допомогою супутникової місії Експеримент з Відновлення Гравітації та Клімату (GRACE) та продуктів Глобальної системи засвоєння земельних даних (GLDAS) у Google Earth Engine (GEE). У дослідженні використовуються дані GRACE для аналізу загального запасу води (TWS) та гідрологічних компонентів, які GLDAS надає як доповнення. Об'єднання цих наборів даних у GEE має на меті зрозуміти тенденції підземних вод від сезонних до довгострокових. У дослідженні спостерігалось середнє зменшення запасів підземних вод, зі спостережуваними стресами протягом більш сухих, ніж зазвичай, періодів у 2015-2016 та 2018-2020 роках. Всупереч цій довгостроковій тенденції до зниження рівень ґрунтових вод зазвичай підвищується протягом вологих сезонів і знову падає протягом посушливих сезонів, що демонструє сезонність зберігання. Результати мають пришвидшити розгляд кращих підходів до управління водними ресурсами, щоб зупинити подальше виснаження ґрунтових вод за допомогою таких методів, як кероване поповнення водоносного горизонту та максимізація ефективності зрошення. Це дослідження є гарним прикладом використання даних GRACE та GLDAS для регіонального моніторингу ґрунтових вод, тим самим закладаючи міцну основу для втручань, спрямованих на зменшення дефіциту води для Срейджен Регенсі та за його межами. Ця інформація також слугуватиме внеском у прийняття управлінських рішень, особливо пов'язаних з розподілом ресурсів прісної води в періоди мінливості клімату та зростаючого антропогенного тиску.

Ключові слова: зберігання ґрунтових вод, супутник GRACE, GLDAS, Google Earth Engine, Срейджен Регенсі.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 14 березня 2025 р.

Прийнята 27 квітня 2025 р.

ГЕОГРАФІЯ

<https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-11>

УДК 551.4

Надійшла 3 лютого 2025 р.

Прийнята 13 березня 2025 р.

Основні закономірності сучасної морфодинаміки річок Карпатського регіону

Галина Байрак

к. геогр. н., доцент, докторант кафедри геоморфології і палеогеографії географічного факультету
Львівського національного університету імені Івана Франка, Львів, Україна,
e-mail: halyna.bayrak@lnu.edu.ua,  <http://orcid.org/0000-0002-4802-2706>

У статті розкрито види та загальні закономірності морфодинаміки річок Карпатського регіону на основі різночасової картографічної та супутникової інформації. Методи досліджень – ГІС-технології, методи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), картографічний, порівняльний, польові дослідження. Зокрема, використано програмне середовище QGIS, в якому було геокодовано карти та супутникові дані різних часових зрізів. Для аналізу динаміки русел було використано карти 1870–1940-х років з ресурсу "Mapy archiwalne Polski i Europy" масштабів 1:75 000 і 1:100 000, топографічні карти 1950–1990-х років масштабів 1:50 000 і 1:100 000, карти з ресурсу Open Street Map 2014 р., супутникові дані 2005–2021 років з ресурсу Google Earth розрізненням 1 м/пікс та ресурсу EO Browser 2024 р. (розрізнення 10 м/пікс). Було виділено сім морфологічних типів річкових русел: однорукавне пряме, однорукавне злегка звивисте, однорукавне меандроване, дворукавне пряме, дворукавне злегка звивисте, багатурукавне пряме, багатурукавне злегка звивисте. Після того проаналізовано характер змін цих типів русел у часі. Інформацію про морфодинаміку русел було згруповано у десять часових зрізів станом до екстремальних паводків 1900, 1927, 1941, 1969, 1980, 1989, 2008, 2014 і 2020 років, а також стан на 2024 р. Було обчислено кількість типів русел станом на певний часовий зріз по відношенню до загального числа даних на цей період. На основі аналізу морфодинаміки русел були виділені основні види зміщень: поперечний і поздовжній. До поперечних видів відносимо: паралельне зміщення русел відносно осі заплави, зміни однорукавних на дво- і багатурукавні, розширення радіуса меандрів, їхнє розвернення на 180°, зміни типу меандрів, відмирання рукавів у розгалужених руслах. Поздовжні види зміщень такі: зміни довжини поясу меандрування, зміщення меандрів вниз за течією, зміни їхніх шийок і вершин, зміщення рукавів вниз за течією. Було показано, що відрізки річок, маючи певну форму і змінюючись по латералі, за деякий період часу повертаються до вихідної форми, тобто відбувається певний цикл змін ділянок русел. Врахування особливостей річкової морфодинаміки важливе для планування освоєння заплави і низьких терас, проектування безпечних і стійких споруд, які не зазнаватимуть ушкоджень від змін русел річок.

Ключові слова: морфодинаміка, морфологія русел, річки, горизонтальні деформації, типи русел, ГІС-технології, ДЗЗ, Карпатський регіон.

Як цитувати: Байрак Галина (2025). Основні закономірності сучасної морфодинаміки річок Карпатського регіону. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (62), 146–159. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-11>

In cites: Bayrak Galyna (2025). Main patterns of modern river morphodynamics of the Carpathian region. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (62), 146–159. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-11> [in Ukrainian]

Вступ. Морфодинаміка річок є діяльним різновидом морфодинаміки рельєфу, рушійною силою у розвитку річкових долин, яка постійно змінює їхні обриси. Динаміка річок відіграє ключову роль у формуванні морфології земної поверхні, річки активно змінюються самі і впливають на зміни компонентів середовища [10]. Розуміння морфодинаміки річок важливе для забезпечення безперерйного функціонування інфраструктури, безпеки діяльності і проживання людей, ефективного управління водними ресурсами. Дослідження морфодинаміки річок є пріоритетним у Карпатському регіоні, який відрізняється своєрідністю природних умов, густою мережею річок, значними коливаннями їхньої водності, ризиками паводків та активними річковими переформуваннями.

© Байрак Галина, 2025

Мета роботи: дослідити види та загальні закономірності морфодинаміки річок Карпатського регіону на основі різночасової картографічної та супутникової інформації.

Методи досліджень. Авторські дослідження морфодинаміки річок виконувалися для таких відрізків: Бистриці Тисменицької від краю Карпат до с. Озими (Байрак, 2024) [4]; Дністра на відрізку Стрілки–Тершів (Байрак, 2024) [2]; Підбужа (Байрак, 2016) [3]; Стривігора (Байрак, Ковальчук, 2017) [5]; Тиси на перетині Вулканічного хребта (Байрак, 2011, 2024) [6, 2]; Чечви на відрізку Спас–гирло Лімниці. Окрім власних досліджень динаміки русел, у статистиці враховувалися дослідження відрізків річок таких авторів: Сельського і Ковальської (2007) – р. Бистриця від Івано-Франківська до гирла Дністра [16]; Горіш-

нього (2024) – Дністер від Ст.Самбора до Самбора [9]; Бурштинської та ін. (2017) – Дністер на відрізку Чайковичі–Миколаїв [7]; Радзія та ін. (2018) – Дністра на відрізку Розділ–Галич [13]; Ющенко (2005) – Прута в м. Чернівці [18]; Рибак і Дубіс (2021, 2024) – Сукіль на відрізку Буковець–Болевів [14, 26]; Горішнього (2014) – Стрий на відрізку Стриганці–Заліски [8] (рис. 1). Деякі дослідження авторів були доповнені сучасними авторськими опрацюваннями супутникових даних.

Для відображення морфодинаміки карпатських річок були використані ГІС-технології, зокрема, програмне середовище QGIS, в якому було геокодовано карти та супутникові дані різних часових зрізів. Після цього виконано векторизацію русел річок станом на кінець XIX, XX та початок XXI ст. Було використано карти 1870–1940-х років з ресурсу "Mapy archiwalne Polski i Europy" масштабів 1:75 000 і 1:100 000, топографічні карти 1950–1990-х років масштабів 1:50 000 і 1:100 000, карти з ресурсу Open Street Map 2014 р., супутникові дані 2005–2021 років з ресурсу Google Earth

розрізненням 1 м/пікс та ресурсу EO Browser 2024 р. (розрізнення 10 м/пікс).

Ключові чинники морфодинаміки річок.

Морфодинаміка досліджуваних річок найчастіше відбувається на Передкарпатській височині, хоч всі річки беруть початок у гірській області Українських Карпат. Їхні русла на Передкарпатті належать до напівгірського та рівнинного типів, за Чаловим (1986). У передгірській області переважають широкозаплавні геоморфологічні умови формування русел, за яких вони здійснюють горизонтальні деформації, в гірській – здебільшого врізані та адаптовані типи, у яких можливостей для переформування русел значно менше. Поздовжні ріки гірської області Карпат теж мають широкозаплавні типи русел, у яких, як правило, змінюється коефіцієнт звивистості, що було показано на прикладі р. Підбуж [3]. Поперечні до простягання Карпат річки мають вервицеподібну в плані будову долин, тому морфодинаміка можлива в місцях їхніх розширень, що можна побачити на прикладі динаміки русла Дністра у нижній гірській течії [2].

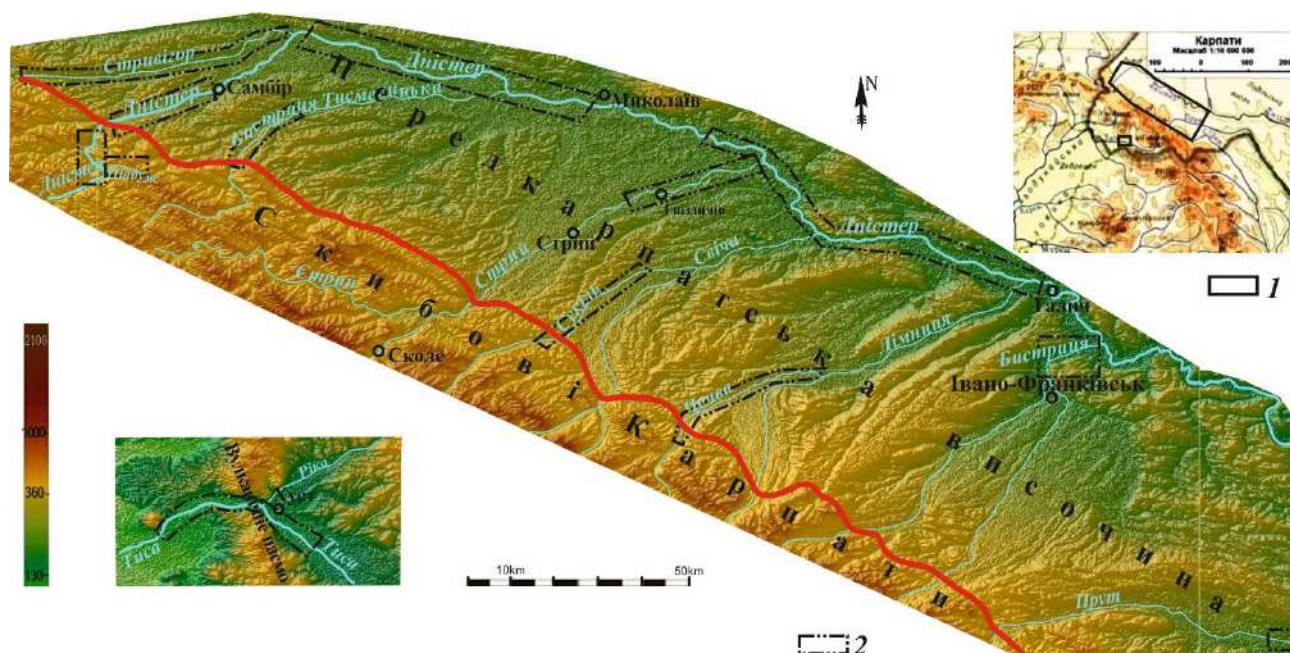


Рис. 1. Територія досліджень (розробка авторки на основі даних SRTM). Умовні позначення:

1 – межі території; 2 – ділянки русел, на яких вивчалася морфодинаміка різними авторами /

Fig. 1. Research area (author's design based on SRTM data). Legend:

1 – boundaries of the area; 2 – sections of channels where morphodynamics were studied by different authors

Береги карпатських річок, за нашими спостереженнями, складені галечниками з піщано-гравійним і суглинистим заповнювачем, з домішками валунів. Валуни, галька і гравій представлені переважно пісковиками, рідше кременями, вапняками, а у деяких річок, наприклад, Бистриці – мергелями. Всі фракції, винесені з гір, добре обкатані, а з віддаленням від гір зменшується розмір уламків. Уламковий та піщаний склад відкладів берегів не перешкоджає динаміці русел.

Морфодинаміка річок у великій мірі залежить від ухилу дна потоків. У гірській частині, де річки мають врізані русла, за нашими дослідженнями, ухили сягають 80–100 ‰, швидкості течії – 1,4–1,7 м/с. За таких характеристик потоки, як правило, прямолінійні, їхня морфодинаміка незначна. В улоговиноподібних розширеннях та при виході з гір ухили спадають до 5–10 ‰, швидкості течії – 0,7–0,8 м/с. За таких умов русла здебільшого однорукавні та мають тенденцію змін ступе-

ня звивистості. На передгірських ділянках із широкими заплавами ухили сягають 3–5 %, швидкості течії 0,3–0,6 м/с. Тут спостерігається динаміка як звивистості річок, так і переходи від однорукавного до розгалуженого русла і навпаки.

Дослідження кліматичних особливостей і закономірностей річкового стоку карпатських річок були висвітлені в ряді публікацій [1, 15, 17]. Найважливішими передумовами переформування русел річок є режим та кількість опадів, зокрема, тривалість та сила дощів, а безпосереднім чинником – екстремальні паводки. Так, наприклад, дуже сильні дощі випали 22–28.07.2008 р., сума опадів за цей період у Львівській обл. склала 310 мм, тобто 110–250% місячної норми опадів, за даними Львівського регіонального центру гідрометеорології. Катастрофічний паводок почався 28.07.2008 р., коли рівень води на притоках Дністра збільшився на 5,6, 4,8 і 4,0 м і був максимальним на р. Стрий – 8 м. Активізацію небезпечних процесів у Карпатах таких, як паводки, селі викликають добові суми опадів у 160 мм [12].

Основи досліджень. Найактивнішими в Карпатському регіоні є планові (латеральні) зміни річок, суть яких полягає у змінах форми русел та кількості руслових виїмок (рукавів) або

горизонтальних деформаціях. У наших дослідженнях ми брали до уваги такі типи русел: пряме, злегка звивисте (боковикове та обмеженого меандрування, за іншими класифікаціями) і меандроване (вільне та незавершене меандрування). За кількістю рукавів виділили однорукавне, дворукавне (або однобічно розгалужене, за Ободовським, 1998 [10, с. 42] і багаторукавне (три і більше рукавів) русла. Розглядали саме заплавної території локально, на невеликих відрізках, зустрічаються ділянки із русловою дворукавністю, а руслової багаторукавності не спостерігається. Критерієм виділення типу русла деякого відрізка брали співвідношення 70:30, тобто якщо 70 % і більше довжини відрізка русла належить до одного типу, то весь відрізок русла зачисляли до цього типу. Якщо співвідношення 50:50 чи 60:40, то відповідно означували два типи.

Виділили сім морфологічних типів русел річок, характерних для Карпатського регіону: однорукавне пряме, однорукавне злегка звивисте, однорукавне меандроване, дворукавне пряме, дворукавне злегка звивисте, багаторукавне пряме, багаторукавне злегка звивисте (рис. 2). Відтак було проаналізовано характер змін цих типів русел у часі.



Рис. 2. Морфологічні типи русел карпатських річок / Fig. 2. Morphological types of Carpathian channels

Суттєве переформування русел річок, як відомо, відбувається після катастрофічних паводків. Тому стани русла, які були зафіксовані на гео-зображеннях у різні часові періоди, згрупували до дати чергового екстремального паводку і отримали дев'ять часових зрізів минулого та сучасний стан. Це стани русла до видатних паводків 1900, 1927, 1941 років, катастрофічного паводку 1969 р., видатних паводків 1980 і 1989 р., катастрофічного паводку 2008 р., видатних паводків 2014 і 2020 років, а також 2024 р. (табл. 1).

Результати досліджень. На основі виділених морфодинамічних відрізків річок було обчислено кількість русел станом на певний часовий зріз у відсотках до загального числа даних на цей зріз. Окремо обчислені дані для 22 і 13 показників (рис. 3).

Однорукавні прямі типи русел до 1900 і 1927 років мали незначне поширення, їхня частка становила 14–15 %. До 1941 р. зросла і сягнула 31%, а до 1969 р. знизилася до 23%. Після червневого

паводку 1969 р. і до 1980 р. частка однорукавних прямих типів русел вдруге зменшилася до 15%. До 1989 р. їх частка збільшилася до 45%, що є найбільшим значенням для цього типу за період спостережень. Станом на 2008 р. їхня частка зменшилася до 27% і відтак до 2014 р. зменшилася втричі. Станом на 2020 р. однорукавних прямих типів русел стає 23%, як у 1940–1969-х роках. Станом на 2024 р. їх лише 8%. Однорукавні прямі типи русел у Карпатському регіоні найчастіше трансформувалися у злегка звивисті, що є доволі закономірним явищем. Інші типи, у які переходили однорукавні прямі русла – це дворукавні прямі, однорукавні меандровані і дуже рідко в багаторукавні злегка звивисті. Не спостерігаємо їхніх переходів у дворукавні злегка звивисті і багаторукавні прямі.

Однорукавні злегка звивисті типи русел є найпоширенішими у XX–XXI ст. Найбільше даного типу річок спостерігається зараз, станом на 2024 р., їхня частка становить 62%. Протягом по-

Таблиця 1 / Table 1

Типи русел річок Карпатського регіону у різні часові зрізи до проходження екстремальних паводків
XIX–XXI ст. / Types of riverbeds of the Carpathian region in different periods
before the passage of extreme floods of the 19th–21st centuries

	До 1900	До 1927	До 1941	До 1969	До 1980	До 1989	До 2008	До 2014	До 2020	До 2024
Бистриця Тисменицька, 1й відрізок (Уріж, за Байрак, 2024)										
Бистриця Тисмен. 2й відрізок (Винники, за Байрак, 2024)										
Бистриця Тисмен. 3й відрізок (Мокряни, за Байрак, 2024)										
Бистриця (за Сельським, Ковальською, 2007)	 1,56			 1,31		 1,23				
Дністер (Стрілки– Тершів, за Байрак, 2024)										
Дністер (Ст. Самбір– Самбір, за Горішнім, 2024)						 1,13*	 1,31*	 1,25*	 1,27*	 1,27*
Дністер (Чайковичі– Миколаїв, за Бурштинсь- кою та ін., 2017)	 2,2	 1,2				 1,3		 1,3		
Дністер (Роз- діл–Галич, за Радзій та ін., 2018)	 1,63								 1,33	
Прут (в м. Чернівці, за Ющенком, 2005)						 *	 *	 *	 *	
Сукіль 1й (Буковець– Поляниця, за Рибак, Дубіс 2024)	 1,35		 1,27				 1,06		 1,15	
Сукіль 2й (Тисів–Боле- хів, за Рибак, Дубіс, 2024)	 1,62		 1,53			 *	 1,3		 1,36	

Стрий 1й (Стриганці– Гніздичів, за Горішним, 2014)										
Стрий 2й (Гніздичів– Жидачів, за Горішним, 2014)										
Стрий 3й (Жидачів– Заліски, за Горішним, 2014)										
Тиса 1й (поблизу м. Хуст, за Байрак, 2024)										
Тиса 2й (вздовж с. Крива, за Байрак, 2024)										
Тиса 3й (вздовж г. Саргеть за Байрак, 2024)										
Тиса 4й (Веряца– Королево, за Байрак, 2024)										
Тиса 5й (вздовж г. Чорна Гора, за Байрак, 2024)										
Чечва 1й (на межі ви- ходу з гір, Спас– В.Струтинь)										
Чечва 2й (Верхній– Нижній Струтинь)										
Чечва 3й (Сваричів– Довге Калуське)										
Загальна сума відрізків	22	13	13	13	13	22	22	13	22	13
	До 1900	До 1927	До 1941	До 1969	До 1980	До 1989	До 2008	До 2014	До 2020	До 2024

* доповнено авторкою.

Числа в клітинках – коефіцієнт звивистості: 1,15 і менше – прямі; 1,16– 1,30 – злегка звивисті; 1,31 і більше – меандровані.

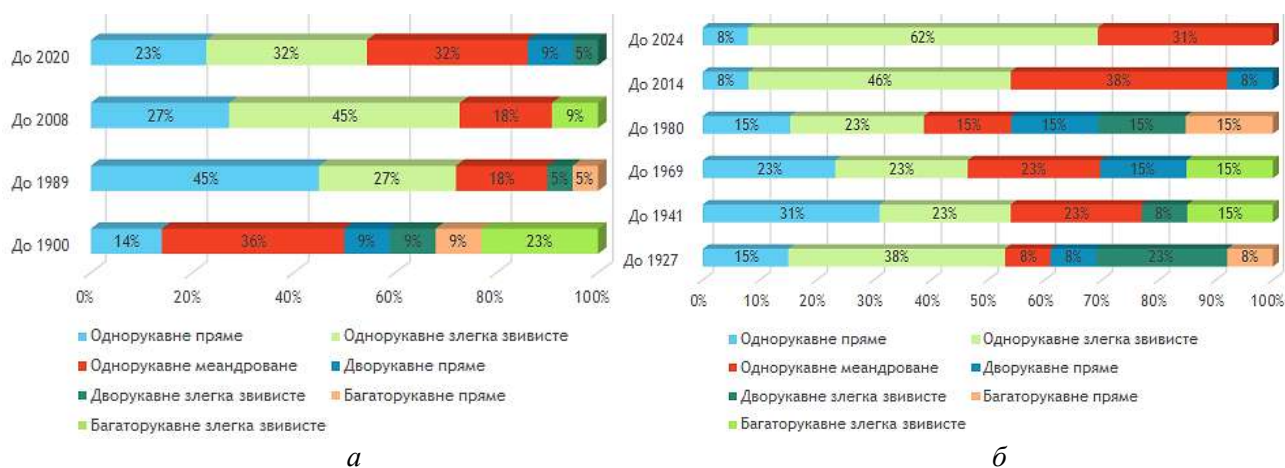


Рис. 3. Динаміка типів русел за часові зрізи: *а* – із 22 показниками спостережень; *б* – із 13 даними /
Fig. 3. Dynamics of channel types over time periods: *a* – with 22 observation indicators; *b* – with 13 data

передніх років ХХІ ст. їхня частка теж досить велика і становить більше третини від усіх типів річок (32–46%). Трохи менше даного типу русел було протягом ХХ ст. – 23–27%, хоча перед тим, до 1927 р., вони сягали 38%. У ХІХ ст. цей тип русел не був поширений або можливо усі злегка звивисті русла зображали на картах як прямі. Злегка звивисті типи русла закономірно трансформувалися у меандровані або прямі однорукавні типи русел, причому зі звивистих у меандровані переростали частіше, ніж в прямі. Вони також зрідка переходили у всі інші виділені нами типи.

Однорукавні меандровані типи русел були значно розповсюджені до 1900 р., їхня частка становила 36% від загального числа. Це відрізки Дністра, Сукелю, Стрия, Прута на Передкарпатті. Вдруге такого поширення – більше 30 %, вони набули у сучасний період, після паводку 2008 р. Протягом ХХ ст. меандрованих русел було мало, їхня частка сягала 15–23%. Найменше, зокрема, 8% їх було до 1927 р. Однорукавні меандровані типи русел найбільше змінювалися на однорукавні злегка звивисті і трохи менше на прямі. На коротких відрізках були їхні трансформації у дворукавні прямі і злегка звивисті типи русел. Не спостерігалось їхніх перетворень у багаторукавні типи, хоч ширина заплав це дозволяє.

Дворукавні прямі типи русел були слабо поширеними до 1900 і до 1927 р., їхня частка становила 9%. У 1930-х роках вони зникають, переходять в однорукавні злегка звивисті типи. Виникають знову у 1950–1970 роках, сягаючи 15 %. У кінці ХХ–на початку ХХІ ст. вони трансформувалися в інші, здебільшого однорукавні типи. Знову виникли після паводку 2008 р. і локально існували на р. Прут перед м. Чернівці і Бистриці між с. Уріж–Винники. Зараз, починаючи з 2020 р., вони відсутні. Дворукавні прямі в результаті пересихання одного із рукавів переходили найчастіше в однорукавні злегка звивисті типи русел.

Трансформувалися вони також в однорукавні прямі та дворукавні звивисті типи.

Дворукавні злегка звивисті типи були поширені у 1900–1927 і 1970-х роках, сягаючи 23 і 15% відповідно. Даного типу русел не спостерігалось у 1940–1960-х і 1990–2014, а також 2020–2024 роках. В інші періоди (до 1900, 1927–1941, 1980–1989, 2014–2020 роки) їхня частка була менше 10%. Після паводку 2014 р. цей тип русла був поширений на відрізку Стриганці–Гніздичів на р. Стрий. Дворукавні злегка звивисті типи змінювалися на однорукавні злегка звивисті, прямі, рідше – меандровані типи. У два періоди вони також трансформувалися у прямі дворукавні.

Багаторукавні прямі типи русел, як і дворукавні прямі, не були поширеним типом русел у досліджуваному регіоні. Їхня частка була найбільшою у 1970-х роках, зокрема, становила 15%. До 1900 і до 1927 років, а також у 1980-х роках їх було менше 9%. Ці типи русел існували короткий період і в двох випадках із п'яти трансформувалися в однорукавні прямі або дворукавні злегка звивисті типи, а в одному випадку – в однорукавне меандроване русло.

Багаторукавні злегка звивисті типи теж були не надто поширені і їхня частка постійно зменшувалася аж до повного зникнення. До 1900 р. цього типу русла налічувалося найбільше – 23%. Дослідження польських колег теж показало переважання багаторукавних русел у ХІХ ст. [20]. У 1930–1960-х роках зменшилося до 15% і на межі ХХ–ХХІ ст. становило 9%. На початку ХХ ст., у 1980-і роки, після 2008 р. і до сьогодні їх не спостерігаємо. Багаторукавні злегка звивисті типи у двох випадках із шести стали прямішими, а в інших випадках трансформувалися в однорукавні типи.

Однорукавних русел було мало до 1900 р., їхня кількість неодноразово змінювалася, максимум спостерігався станом на 1989 р. Велика кіль-

кість однорукавних русел спостерігається у теперішній період, 2008–2024 років. До 1900 р. спостерігалася значна частина дво- і багаторукавних русел, кількість яких знизилася до 1989 р. Дворукавні русла на 2008 р. зникають, але на 2020 р. відновлюють своє існування у кількості дещо меншій, ніж до 1900 р. Багаторукавні русла до 2008 р. ще були наявні, тоді як після цього року відсутні (рис. 4).

Кількість прямих типів русел закономірно зростає з 1942 до 1980–1989 років. Їх налічувалося значно менше до 1900 і від 1900 до 1941 років, а також від 2008 до 2024 років. Тобто у середині–наприкінці ХХ ст. кількість прямих типів русел була максимальна. Динаміка прямих типів русел розвивалася так: середня кількість (ХІХ ст.) → поступове зменшення (початок ХХ ст.) → збільшення (середина і кінець ХХ ст.) → різке зменшення (початок ХХІ ст.).

Кількість русел злегка звивистого типу до 1900 р. була незначною, на початку ХХ ст. їх стало

значно більше, так само, як і на початку ХХІ ст. У середині–наприкінці ХХ ст. їх кількість дещо знизилася. Динаміка цього типу русел була поступовою: незначна кількість (ХІХ ст.) → збільшення (початок ХХ ст.) → зменшення (середина і кінець ХХ ст.) → збільшення (початок ХХІ ст.).

Динаміка русел однорукавного меандрованого типу розвивалася так: значне поширення (до 1900 р.) → зменшення (поч. ХХ ст.) → незначне збільшення (середина ХХ ст.) → зменшення вдруге (кін. ХХ ст. – до 2008 р.) → збільшення вдруге (до 2020 р.) → зменшення втретє (до 2024 р.). Ця динаміка стосується широкозаплавних напівгірських типів русел, які можуть трансформуватися із меандрованих у злегка звивисті і прямі типи. Для широкозаплавних рівнинних типів русел, у яких тип русла стабільно меандрований, динаміка проявляється у змінах коефіцієнта звивистості. Так само змінюється коефіцієнт звивистості для широкозаплавних гірських русел злегка звивистого типу (рис. 5).

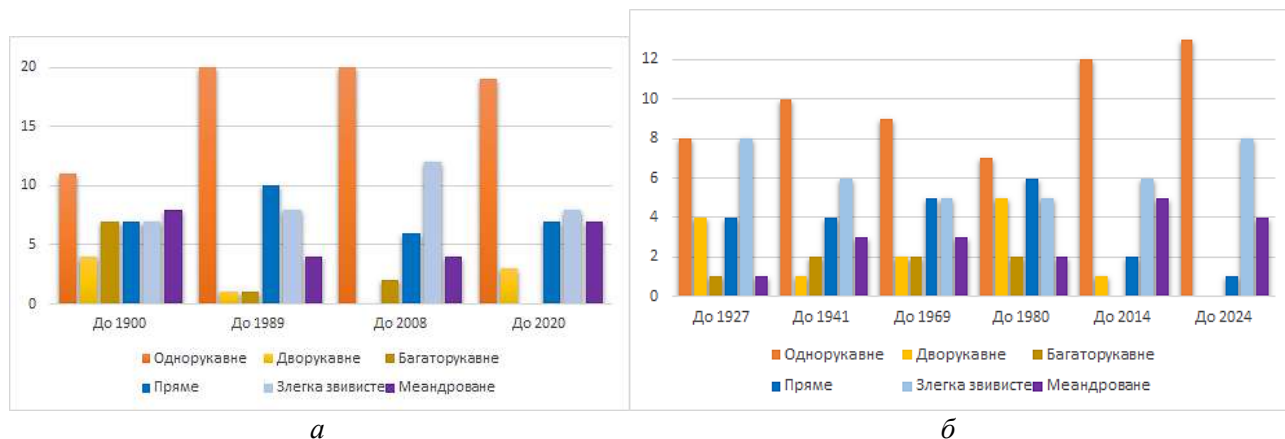


Рис. 4. Динаміка типів русел окремо за кількістю рукавів і звивистістю: *a* – 22 даних; *b* – 13 даних спостережень / Fig. 4. Dynamics of riverbed types separately by the number of branches and sinuous: *a* – 22 data; *b* – 13 observation data

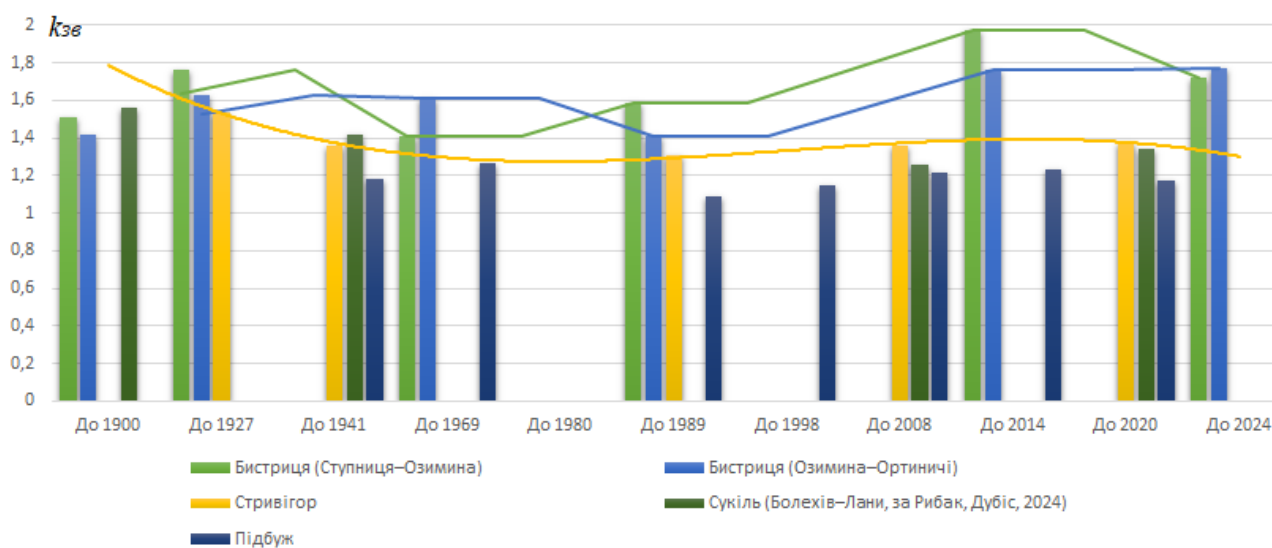


Рис. 5. Динаміка меандрованих типів русел карпатських річок / Fig. 5. Dynamics of meandering channel types of Carpathian river

Динаміка коефіцієнта звивистості проявлялася по-різному, особливо це стосується середини–кінця ХХ ст. У ХІХ ст. коефіцієнт звивистості значний – 1,42–1,56. На початку ХХ ст. він ще більше зростає, максимально до 1,76. Починаючи із середини ХХ ст. до 1989 р. поступово знижується, сягаючи мінімальних значень в одних випадках до 1969 р., в інших – до 1989 р. До 2008 р. звивистість зростає, сягаючи значень 1941 р. Максимальна звивистість русел спостерігається після катастрофічного паводку 2008 р. і до 2014 р. Відтак у 2020-х роках дещо зменшується або залишається без змін там, де відіграє роль закріплення берегів рослинністю.

Підсумки досліджень. На основі аналізу змін морфологічних типів русел, виділяємо два види зміщень русла відносно центральної осі низької заплави або поясу руслоформування (за Паланичко, 2023, [11]): поперечний і поздовжній. У кожному із видів виокремлюємо різновиди, характерні для кожного типу русла. В однорукавного прямого типу русла поперечна динаміка проявляється в паралельному зміщенні відносно осі заплави до одного з берегів (*A1a*, рис. 6). Як було досліджено науковцями Schumm, 1977; Knighton, 1998; Fryirs & Brierley, 2013 [22, 24, 27], це зміщення відбувається внаслідок зміни динамічної осі потоку, що часто виникає після паводків. Виконуючи глибинну ерозію ложа і бокову ерозію одного з берегів, русло мігрує у низькій заплаві з розмивними берегами.

До поперечного виду зміщень русла відносимо зміну однорукавного на дворукавний (*A1b*) і багаторукавний (*A1c*) типи. Таким змінам передують розподіл динамічної осі потоку під час паводку на дві чи більше вітки, в залежності від ширини русла. Між цими вісьми накопичуються наноси, які поступово збільшуються і перетворюються на осередки, розділяючи потік на рукави, формується руслова багаторукавність. На річках Карпат і Передкарпаття руслова багаторукавність поширена на коротких проміжках, приблизно 20–50 м і вона не є переважаючим типом русла. Заплавна багаторукавність формується тоді, коли паводкові води затоплюють високу заплаву, а після спадання води залишаються протяжні рукави. Як показали наші дослідження, заплавна багаторукавність на карпатських річках формувалася нечасто, більше утворювалися дворукавні русла.

Ще одним видом поперечних зміщень є зміна однорукавного прямого на звивистий тип русла (*A1d*). Пояснення як русло із прямого переходить у звивисте знаходимо у працях Leopold, Wolman & Miller, 1964; Huggett, 2007; Anderson, 2010 та ін. [25, 23, 19]. Поштовхом до переформування русла з прямого на звивисте вважають перекіс водної поверхні після паводку і форму-

вання асиметричного поперечного профілю русла



. Тиск із зовнішньої, ввігнутої частини звивини більший, ніж тиск із внутрішньої, випуклої сторони, оскільки глибина води більша із зовнішньої сторони за рахунок відцентрової сили, що діє на потік води. В результаті у ньому активізуються поперечні циркуляційні течії, у яких поверхневі струмені направлені до ввігнутої ділянки, а придонні – до випуклої. Здійснюючи бокову ерозію ввігнутого берега та акумуляцію на випуклому, вигини наростають, перетворюючись на меандри. Сприяє виникненню вигинів як поперечне переміщення наносів, так і поздовжнє, яке зумовлює вимивання та перевідкладання матеріалу. На зростання звивистості впливає водність річки: якщо об'єм води малий, то русло вузьке, потік мілководний, швидкість течії незначна, річка петляє вздовж заплави, прокладаючи шлях із найменшим опором.

Для однорукавного злегка звивистого русла різновидом поперечної динаміки є багатократне зміщення вигинів до одного із берегів (*A1e*), пов'язане з активною боковою ерозією випуклого берега; а також розвернення вигину на 180°, яке відбувається в результаті заповнення алювіальними відкладами діючого русла і прорив нового вигину у староріччя. Наступним різновидом поперечної динаміки однорукавного злегка звивистого типу русла є його зміни на прямий (*A1g*) або меандрований (*A1f*) тип. Зміна звивистого на прямий тип русла пов'язана зі зростанням водності річки, швидкості течії, розширенням і поглибленням русла, що сприяє його прямолінійності. Переходу із злегка звивистого у меандрований тип сприяють відцентрові сили, що діють на потік води і направлені від внутрішньої до зовнішньої сторони меандри, внаслідок чого відбувається бокова ерозія і наростання випуклості звивин. Ще одним різновидом поперечної динаміки однорукавного злегка звивистого русла є його зміни на дво- і багаторукавний морфотип. Він розвивається подібно до змін однорукавного прямого типу на дво- і багаторукавний, коли у потоці з'являється дві чи кілька динамічних осей, які після паводку розгалужують русло. Перехід однорукавного звивистого типу у багаторукавний може бути пов'язаний також із блуканням динамічної осі потоку, нерівномірністю течії, яка після паводків утворює нові протоки.

В однорукавному меандрованому типі виділяємо такі різновиди поперечної динаміки: багаторазове зміщення вершин меандр (*A1h*), зміни ширини поясу меандрування (*A1i*), зміни на прямий (*A1k*) чи злегка звивистий типи (*A1j*), зміни на дво- чи багаторукавний типи, зміни морфотипу меандри із сегментної на синусоїдальну (*A1l*),

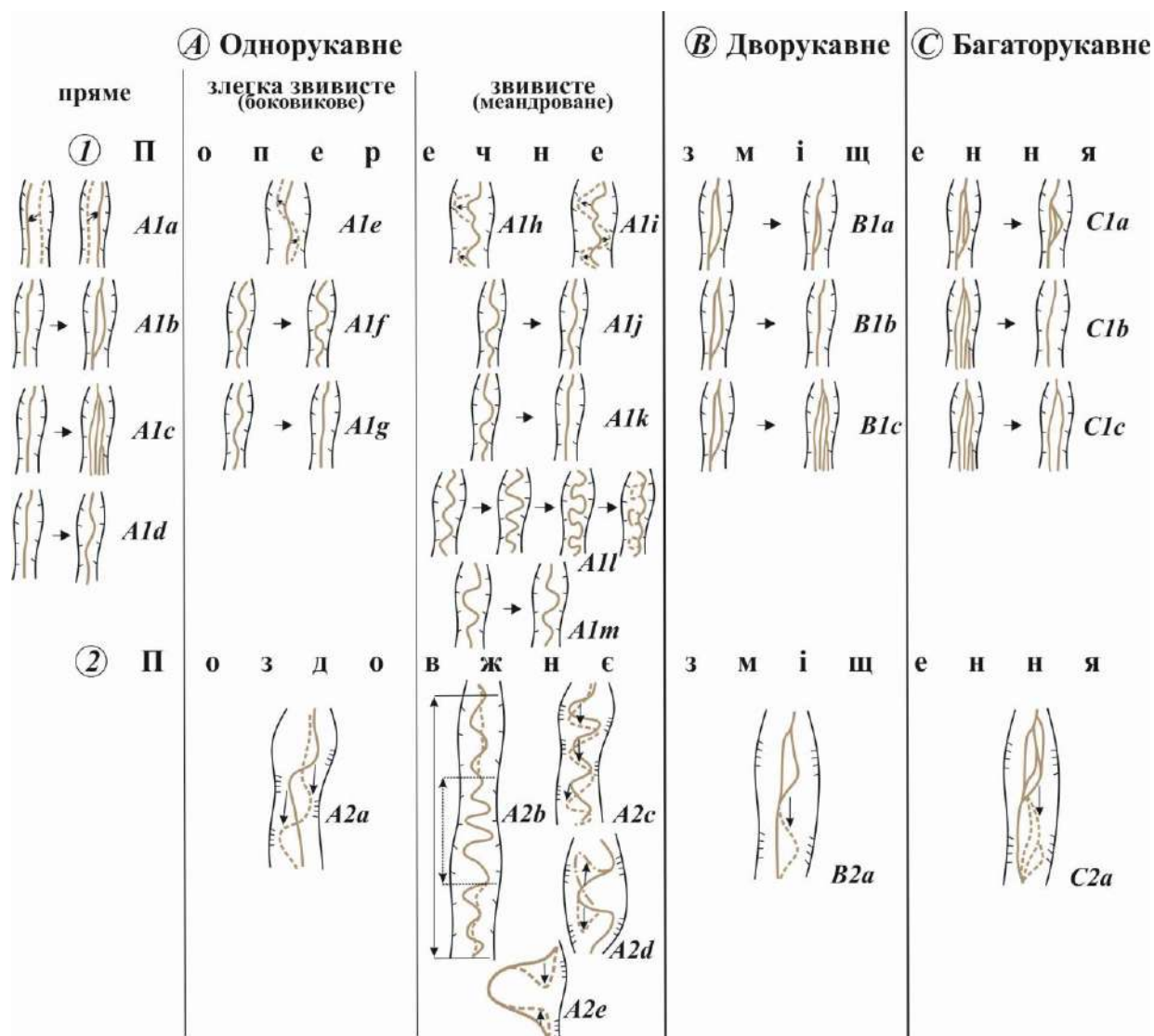


Рис. 6. Види зміщень русла відносно осі заплави. Легенда: 1. Поперечне зміщення.

A. Однорукавне русло: *A1a* – зміщення прямого русла до одного з берегів; зміна: *A1b* – на дворукавне; *A1c* – на багаторукавне; *A1d* – з прямого на звивисте; *A1e* – зміщення вигинів русла від середини до берегів; зміна: *A1f* – зі злегка звивистого на меандроване; *A1g* – зі злегка звивистого на пряме; *A1h* – зміщення вершин меандр; *A1i* – зміна ширини поясу меандрування; зміна: *A1j* – з меандрованого на злегка звивисте; *A1k* – з меандрованого на пряме; *A1l* – зміна типу меандри (сегментна → синусоїдальна → петлеподібна → прорвана); *A1m* – розвернення на 180°. B. Дворукавне русло: зміна *B1a* – параметрів рукава (острова); *B1b* – на однорукавне; *B1c* – на багаторукавне. C. Багаторукавне русло: зміна *C1a* – параметрів рукавів; *C1b* – на однорукавне; *C1c* – на дворукавне.

2. Поздовжнє зміщення. *A2a* – зміщення вигинів і підмивів вниз за течією; *A2b* – зменшення/збільшення довжини поясу меандрування; *A2c* – зміщення меандр вниз за течією; *A2d* – зміна типу меандри на завалену; *A2e* – звуження шийки меандри; *B2a* – зміщення рукава вниз за течією та зміна його довжини; *C2a* – зміщення рукавів вниз за течією та зміна їхньої довжини /

Fig. 6. Types of channel displacements relative to the floodplain axis. Legend: 1. Transversal displacement. A. Single-thread channel: *A1a* – displacement of the straight channel to one of the banks; change: *A1b* – to two-thread; *A1c* – to multi-thread; *A1d* – from straight to sinuous; *A1e* – displacement of the channel bends from the middle to the banks; change: *A1f* – from slightly sinuous to meandering; *A1g* – from slightly sinuous to straight; *A1h* – displacement of the meander vertices; *A1i* – change in the width of the meandering zone; change: *A1j* – from meandering to slightly sinuous; *A1k* – from meandering to straight; *A1l* – change in the type of meander (segmented → sinusoidal → loop-shaped → broken); *A1m* – 180° turn meanders. B. Two-arm channel: change *B1a* – parameters of the thread; *B1b* – to single-thread; *B1c* – to multi-thread. C. Multi-thread channel: change *C1a* – parameters of branch; *C1b* – to single-thread; *C1c* – to two-thread. 2. Longitudinal displacement. *A2a* – displacement of bends and washouts downstream; *A2b* – decrease/increase in the length of the meandering belt; *A2c* – displacement of meanders downstream; *A2d* – change of meander type to blocked; *A2e* – narrowing of the meander neck; *B2a* – displacement of the branch downstream and change of its length; *C2a* – displacement of branch downstream and change of their length

розвернення меандри на 180° (*A1m*). Зміна морфотипу меандр здійснюється в певній послідовності: розмив ввігнутого берега → відступання вершини меандри → збільшення ширини русла → зменшення швидкості течії → розмив припиняється → акумуляція на пляжі випуклого берега → зменшення ширини русла → збільшення швидкості потоку → розмив ввігнутого берега → повторне відступання вершини і видовження меандри. Якщо шийки меандр сильно звужуються, відбувається їхній прорив під час паводку, русло з меандрованого типу стає прямим. Звуження ширини поясу меандрування може бути пов'язане із зменшенням витрати води, зниженням швидкості течії та відповідно зменшенням здатності розмивати береги.

Поперечні різновиди зміщення дворукавного та багатурукавного типів русел полягають у змінах їхнього морфотипу, пов'язаного з кількістю рукавів. Якщо число рукавів зменшується, то його форма спрощується (*B1b*, *C1b*). У карпатських річках спостерігаємо кілька періодів спрощення русла 1900–1927, 1980–1989 рр. і з 2008 р. до сьогодні. Спрощенню русла сприяють такі фактори: зменшення водності річки, яка спричинює обміління рукавів, перетворення їх на стариці; акумуляція матеріалу в рукавах під час паводків, їх зникнення та формування домінуючого русла; посилене антропогенне освоєння басейну, яке сприяє збільшенню потрапляння ґрунту у протоки та їхнє замулення; руслові кар'єри і штучний забір алювію, внаслідок чого посилюється ерозійна здатність річки і концентрація течії в одному руслі.

Відповідно якщо кількість рукавів збільшується, то форма русла ускладнюється (*B1c*, *C1c*). Ускладнення русел на карпатських річках фіксуємо до 1900 р., 1927–1941, 2001–2008 років. Це роки, коли інтенсивність антропогенного втручання у басейні була незначною. Поперечне зміщення дво- і багатурукавних типів русел проявляється також у змінах ширини міжрукавного простору і блукань рукавів далі чи ближче до берега (*B1a*, *C1a*). Ці явища пов'язуємо із розмивом ділянок островів і боковиків, а також нерівномірністю акумуляції матеріалу на руслових формах і заплаві.

У руслі відбувається постійний рух води і наносів з вищележачих до нижчележачих ділянок, тому його відтинки зміщуються вниз за течією. Виділяємо другий вид зміщення – *поздовжній* із різновидами, які стосуються головно звивистих русел. Для однорукавних злегка звивистих русел проявляється такий різновид, як зміщення вигинів і підмивів вниз за течією (*A2a*). Так само в однорукавних меандрованих русел існує *поздовжнє зміщення меандр вниз за течією* (*A2c*). Серед причин поздовжнього зміщення звивин автори наво-

дять такі: дія циркуляційних поперечних течій, які зміщуються паводковими водами, направлені косо і переміщують матеріал вниз за течією; зміщення динамічної осі потоку на верхньому крилі меандри до внутрішнього берега повороту русла, а на нижньому крилі – до зовнішнього під дією поступальних швидкостей [21, 22]. В результаті меандра зміщується вниз за течією, вздовж вісі долини.

Зміни елементів меандр, зокрема, звуження чи розширення вершин, зміна морфотипу меандр із синусоїдальної на завалену (*A2d*), звуження чи розширення шийок у петлеподібних меандрах (*A2e*) – всі ці різновиди відносимо до виду поздовжнього зміщення. Різновидом також є зміна довжини поясу меандрування (*A2b*): зменшення, коли на ділянках меандр відбувається проривання шийок і русло прямішає та збільшення, коли утворюються нові меандри. Поздовжнє зміщення для дво- і багатурукавних типів має один різновид: блукання одного чи двох рукавів вниз за течією та зміна їхньої довжини (*B2a*, *C2a*).

Досліджуючи зміни типів русел карпатських річок, ми з'ясували що у багатьох випадках ці зміни повторюються, тобто є *циклічними*. Циклічність полягає в тому, що об'єкт впливу флювіальних процесів – русло, зазнає деяких змін, але знову повертається до вихідного стану за деякий час. Цикли змін властиві більшості виділеним типам русел. Основою кожного циклу є конкретні відрізки русел карпатських річок.

Розглянемо цикли, які починаються з однорукавних прямих типів русел. Тут сформувався три види завершених циклів морфодинаміки і два незавершених (рис. 7). Перший цикл (*A.a*) має одну ітерацію, що складається із трьох стадій: однорукавного прямого – багатурукавного звивистого русла – однорукавного прямого русла. Незавершений цикл такий: вихідна стадія (однорукавне пряме русло) – стадія однорукавного злегка звивистого русла – невідома майбутня стадія. Другий цикл (*A.б*) має дві ітерації, які включають три-чотири стадії. У першу ітерацію входять стадії: однорукавного прямого – дворукавного прямого – дворукавного звивистого русла – вихідна стадія; друга ітерація: стадія однорукавного прямого – однорукавного злегка звивистого русла – вихідна стадія однорукавного прямого русла; незавершений цикл: вихідна стадія – стадія однорукавного злегка звивистого русла – невідома майбутня стадія. Третій цикл (*A.в*) містить дві ітерації, стадії яких повторюються: однорукавного прямого – однорукавного злегка звивистого русла – і заново однорукавного прямого русла. Найчастіше у цих циклах однорукавне пряме русло переходить у злегка звивисте.

Однорукавним злегка звивистим типам русел

властиві чотири цикли, для яких характерні по одній ітерації. Перший цикл (Б.а) включає стадії: однорукавного злегка звивистого – однорукавного меандрованого русла – вихідна стадія. Другий цикл (Б.б) складається зі стадій: однорукавного злегка звивистого – однорукавного прямого русла – вихідна стадія. Третій цикл (Б.в) має стадії: однорукавного злегка звивистого – одно-

рукавного прямого – однорукавного меандрованого – повторно однорукавного прямого – вихідна стадія однорукавного злегка звивистого русла. Для четвертого циклу (Б.г) характерні стадії: однорукавного злегка звивистого русла – багаторукавного злегка звивистого – багаторукавного прямого – однорукавного меандрованого русла – вихідна стадія.

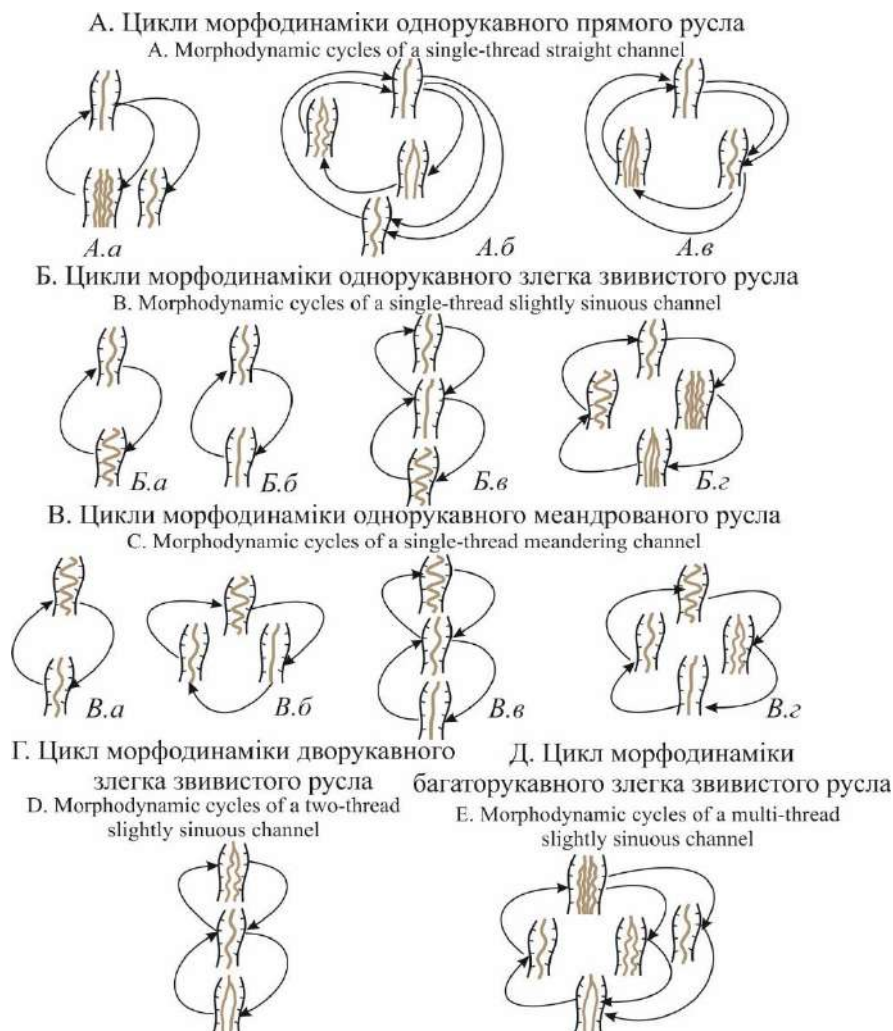


Рис. 7. Циклічність морфодинаміки русел найактивніших відрізків річок Карпатського регіону /
Fig. 7. Cyclicity of morphodynamics of the most active riverbeds of the Carpathian region

Однорукавним меандрованим типам русел притаманні теж чотири цикли морфодинаміки з однією ітерацією у кожному. Перший цикл (Б.а) із такими стадіями: однорукавного меандрованого – однорукавного злегка звивистого русла – вихідна стадія. Другий цикл (Б.б) включає стадії: однорукавного меандрованого – однорукавного прямого – однорукавного злегка звивистого русла – вихідна стадія. У третій цикл (Б.в) залучені стадії: однорукавного меандрованого – однорукавного злегка звивистого – однорукавного прямого – однорукавного злегка звивистого повторно – вихідна стадія меандрованого русла. У четвертий цикл (Б.г) входять такі стадії: однорукавного меандрованого – дворукавного звивистого – одно-

рукавного прямого – однорукавного злегка звивистого русла – вихідна стадія.

Дворукавні та багаторукавні типи русел існують в часі недовго, тому у них спостерігаємо по одному циклу з однією ітерацією. Цикл морфодинаміки дворукавного типу русла (Г): стадія дворукавного звивистого типу – однорукавного злегка звивистого – дворукавного прямого – заново однорукавного злегка звивистого русла – вихідна стадія. Цикл морфодинаміки багаторукавного типу русла (Д): стадія багаторукавного звивистого – дворукавного звивистого – дворукавного прямого – однорукавного злегка звивистого русла – вихідна стадія. Незавершений цикл цього типу русла: стадія багаторукавного звивистого – одно-

рукавного звивистого – дворукавного прямого русла – майбутня стадія.

Обговорення. Циклічність змін показує, що річки, маючи певну форму і змінюючись по латералі, за деякий період часу повертаються до вихідної форми. Абсолютної тотожності між початковим і кінцевим станом русла не спостерігаємо. Хоч злегка звивисте чи меандроване русло через кілька стадій знову переходять у даний тип, проте звивини відрізняються радіусом, стрілою прогину, вершинами від вихідного стану русла.

Морфодинамічні цикли русел характерні для малих передгірських річок у широкозаплавних геоморфологічних умовах формування. Для великих рівнинних річок, що меандрують у широких заплавах, морфодинаміка проявляється в тому, що змінюється їхній коефіцієнт звивистості, а мор-

фотип змінюється вкрай рідко. У врізаних та адаптованих рівнинних річок, а також гірських річок із однорукавним прямим руслом зміна морфотипу не відбувається.

Висновки. Вивчення морфодинаміки русел річок та їхньої циклічності дозволить вирішувати питання прогнозування цих змін та запобігання негативним впливам небезпечних явищ, пов'язаних із розливами річок. Врахування особливостей річкової морфодинаміки важливе для планування освоєння заплав і низьких терас, проєктування безпечних і стійких споруд, які не зазнаватимуть ушкоджень від змін русел річок. Перспективними напрямами даного дослідження стане з'ясування впливу кліматичних та гідрологічних факторів на циклічність руслової морфодинаміки.

Список використаних джерел

1. Архипова, Л. М. (2011). *Природно-техногенна безпека гідроєкосистем: Монографія*. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ.
2. Байрак, Г. (2024). Аналіз динаміки і морфології русел гірської частини Українських Карпат. *Морфодинаміка процесів у західному регіоні України: розвиток та екологічні наслідки*. Монографія / за ред. Р. Гнатюка, Л. Дубіс. Львів: Вид-во ЛНУ ім. І. Франка, 81–90. ISBN 978-617-10-0881-6
3. Байрак, Г. (2016). Зміни русел рік в контексті змін лісистості їхніх басейнів (на прикладі р. Підбуж Старосамбірського району). *Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат і прилеглих територій: збірник наукових праць*, 1(6), 18–31.
4. Байрак, Г. (2024). Морфодинаміка р. Бистриці на Передкарпатті протягом 147-річного періоду. *Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат і прилеглих територій: збірник наукових праць*, 2(17), 112–129. <https://doi.org/10.30970/gpc.2024.2.4561>
5. Байрак, Г., Ковальчук, У. (2017). Морфологія і динаміка русла Стривігора на Передкарпатській височині. *Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат і прилеглих територій: збірник наукових праць*, 1(07), 64–76. <http://dx.doi.org/10.30970/gpc.2017.07.1962>
6. Байрак, Г. Р. (2011). Сучасні руслові процеси і динаміка русла р. Тиси на ділянці перетину Вигорлат-Гутинського вулканічного пасма. *Фізична географія та геоморфологія*, 62, 45–54.
7. Бурштинська Х., Третяк С., Шевчук В. (2017). Дослідження меандрування ріки Дністер з використанням геоінформаційних технологій. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, 1 (33), 113–138.
8. Горішний, П. (2014). Горизонтальні деформації нижньої течії русла р. Стрий у 1896-2006 рр. *Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат і прилеглих територій: збірник наукових праць*, 1(5), 68–74.
9. Горішний, П. (2024). Горизонтальні деформації русла Дністра в Самбірському Придністер'ї. *Морфодинаміка процесів у західному регіоні України: розвиток та екологічні наслідки*. Монографія. За ред. Р. Гнатюка, Л. Дубіс. Львів: Вид-во ЛНУ ім. І. Франка, 90–95. ISBN 978-617-10-0881-6
10. Горяйнов, С. (2024). Перетворювальні можливості геологічних процесів. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія "Геологія. Географія. Екологія"*, (61), 39–54. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-03>
11. Паланичко, О. (2023). Вивчення умов руслоформування річок Передкарпаття в межах алювіальних рівнин. *Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат і прилеглих територій*, 1 (15), 48–65. <http://dx.doi.org/10.30970/gpc.2023.1.3947>
12. Пилипович, О. В., Ковальчук, І. П. (2017). *Геоєкологія річково-басейнової системи верхнього Дністра: монографія*. За наук. ред. І. П. Ковальчука. Львів-Київ : ЛНУ ім. Івана Франка.
13. Радзій, І., Заяць, І., Третяк, С. (2018). Дослідження зміщень русла ріки Дністер засобами ГІС технологій. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, II (36), 106–113.
14. Рибак, Н., Дубіс, Л. (2024). Морфодинаміка р. Сукіль. *Морфодинаміка процесів у західному регіоні України: розвиток та екологічні наслідки*. Монографія. За ред. Р. Гнатюка, Л. Дубіс. Львів: Вид-во ЛНУ ім. І. Франка, 100–109. ISBN 978-617-10-0881-6
15. Ромащенко, М., Савчук, Д. (2002). *Водні стихії. Карпатські повені*. Київ: Аграрна наука.
16. Сельський, В., Ковальська, Л. (2007). *Природно-історичний аспект формування русла р. Бистриця*. Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету. Серія: географія, 2, 26–30.
17. Сусідко, М. М., Полякова, С. О., Щербак, А. В. (2006). Каталог характеристик дощових і сніго-дощових паводків на річках Карпатського регіону за 1989 – 2002 роки. *Наукові праці УкрНДГМІ*, 255, 299–310.
18. Ющенко, Ю. С. (2005). *Геогідроморфологічні закономірності розвитку русел*. Чернівці: Рута.

19. Anderson, R. S., Anderson, S. P. (2010). *Geomorphology. The Mechanics and Chemistry of Landscapes*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511794827>
20. *Antropopresja w wybranych strefach morphoclimatycznych – zapis zmian w rzeźbie i osadach. Praca zbiorowa.* (2012). Wydział Nauk o ziemi Uniwersytetu Śląskiego. Sosnowiec. ISBN 978-83-61644-33-0
21. Charlton, R. (2008). *Fundamentals of Fluvial Geomorphology*. London; New York: Routledge. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4762.2009.883.5.x>
22. Fryirs, K. A., Brierley, G. J. (2013). *Geomorphic Analysis of River Systems: An Approach to Reading the Landscape*. A John Wiley & Sons, Ltd., Publication. URL: www.wiley.com/go/fryirs/riversystems
23. Huggett, R. G. (2007). *Fundamentals of geomorphology. Second edition*. NY: Taylor & Francis e-Library. ISBN 0-203-94711-8 Master e-book ISBN
24. Knighton, D. (1998). *Fluvial Forms and Processes: A New Perspective, 2nd edition*, Oxford: Arnold.
25. Leopold, L. B., Wolman, M. G. & Miller, J. P. (1964). *Fluvial Processes in Geomorphology*, San Francisco, CA: W.H. Freeman.
26. Rybak, N., Dubis, L. (2021). *Horizontal deformations of the Sukil riverbed within the Pre-Carpathian height in 1880–2019. Problems of geomorphology and paleogeography of the Ukrainian Carpathians and adjacent territories: collection of scientific papers*, 1 (12), 197–211. <http://dx.doi.org/10.30970/gpc.2021.1.3464>
27. Schumm, S. A. (1977). *The fluvial system*. N. York: John Wiley & Sons.

Main patterns of modern river morphodynamics of the Carpathian region

Galyna Bayrak

PhD (Geography), Associate Professor, Doctoral Student
of the Department of Geomorphology and Paleogeography,
Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine

ABSTRACT

The article describes the morphodynamics of river sections belonging to the foothill and flatland wide-floodplain channel types of the Carpathian region.

Purpose: to investigate the types and general patterns of river morphodynamics of the Carpathian region based on different-time cartographic information and remote sensing.

Methods: GIS technologies, remote sensing methods, cartographic, comparative, field research. Maps and satellite different time data were geocoded in QGIS software. Maps of the 1870s–1940s from the resource "Archival Maps of Poland and Europe" at scales of 1:75,000 and 1:100,000, topographic maps of the 1950s–1990s at scales of 1:50,000 and 1:100,000, maps from the Open Street Map (2014), satellite data from 2005–2021 from the Google Earth with a resolution of 1 m/pixel and the EO Browser (2024, resolution of 10 m/pixel) were used for analyze the dynamics of riverbeds.

Results. Seven morphological types of river channels were identified: single-thread straight channel, single-thread slightly sinuous, single-thread meandering, two-thread straight, two-thread slightly sinuous, multi-thread straight and multi-thread slightly sinuous channels. Changes in these riverbeds types at different times since 19th century were analyzed. All data of the channels morphodynamics were grouped into ten time periods before the extreme floods of 1900, 1927, 1941, 1969, 1980, 1989, 2008, 2014 and 2020, as well as the situation in 2024. The number of channel types was calculated in relation to the total number for a certain period. There were the most common single-thread straight types in 1980–1989; single-thread slightly sinuous forms in 1900–1927 and 2024; single-thread meandering – before 1900 and 2008–2014; two-thread straight and sinuous types – before 1900 and in 1950–1970, and at other times they were even less or absent; multi-thread straight and sinuous types – before 1900 and in the 1970s. Based on the channels morphodynamics analysis, the following types were distinguished: transversal and longitudinal displacements. Transversal types include parallel displacement of channels relative to the floodplain axis, changes from single-thread to double- and multi-thread channels, expansion of the meander radius, 180-degree turn of meander, changes of meander types, extinction of threads in braided channels. Longitudinal displacements types are as follows: changes in the length of the meandering zone, meanders displacement downstream, changes in the meanders necks and tops, river branches displacement downstream.

Scientific novelty. It was shown that river segments changing laterally return to their original shape over a certain period, and it is a cycle of changes in riverbed sections. The largest number of change cycles was studied for single-thread channels, and four cycles were identified for it. Two cycles were identified for braided channels.

Practical significance. The study of the river morphodynamics and its cyclity will allow solving the problems of predicting these changes and preventing the negative impacts of dangerous phenomena associated with river floods. Taking into account of the river morphodynamics features is important for planning of the floodplains and low terraces development, designing safe and stable buildings that will't be damaged by channel changes.

Keywords: morphodynamics, channel morphology, river, horizontal channel deformations, riverbed types, GIS technologies, remote sensing, Carpathian region.

References

1. Arkhipova, L. M. (2011). *Natural and technogenic safety of hydroecosystems: Monograph*. Ivano-Frankivsk: IFN-TUNG [in Ukrainian].
2. Bayrak, G. (2024). Analysis of the dynamics and morphology of riverbeds of the mountainous part of the Ukrainian Carpathians. *Morphodynamics of processes in the western region of Ukraine: development and ecological consequences*. Monograph / edited by R. Hnatyuk, L. Dubis. Lviv: Publishing House of the Ivan Franko National University of Lviv, 81–90. ISBN 978-617-10-0881-6 [in Ukrainian].
3. Bayrak, G. (2016). Changes in riverbeds in the context of changes in the forest cover of their basins (on the example of the Pidbuzh River in the Starosambir district). *Problems of geomorphology and paleogeography of the Ukrainian Carpathians and adjacent territories: collection of scientific papers*, 1(6), 18–31 [in Ukrainian].
4. Bayrak, G. (2024). Morphodynamics of the Bystrica River in the Precarpathian Mountains during a 147-year period. *Problems of geomorphology and paleogeography of the Ukrainian Carpathians and adjacent territories: collection of scientific papers*, 2(17), 112–129. <https://doi.org/10.30970/gpc.2024.2.4561> [in Ukrainian].
5. Bayrak, G., Kovalchuk, U. (2017). Morphology and Dynamics of the Stryvior Riverbed in the Precarpathian Uplands. *Problems of geomorphology and paleogeography of the Ukrainian Carpathians and adjacent territories: collection of scientific papers*, 1(07), 64–76. <http://dx.doi.org/10.30970/gpc.2017.07.1962> [in Ukrainian].
6. Bayrak, G. R. (2011). Modern channel processes and dynamics of the Tisza River bed at the intersection of the Vyhorlat-Hutyn volcanic range. *Physical Geography and Geomorphology*, 62, 45–54 [in Ukrainian].
7. Burshtynska Kh., Tretyak S., Shevchuk V. (2017). Research on the meandering of the Dniester River using geoinformation technologies. *Modern advances in geodetic science and production*, 1 (33), 113–138 [in Ukrainian].
8. Horishny, P. (2014). Horizontal deformations of the lower reaches of the Stryi River bed in 1896–2006. *Problems of geomorphology and paleogeography of the Ukrainian Carpathians and adjacent territories: collection of scientific papers*, 1(5), 68–74 [in Ukrainian].
9. Horishny, P. (2024). Horizontal deformations of the Dniester riverbed in Sambir Transnistria. *Morphodynamics of processes in the western region of Ukraine: development and ecological consequences*. Monograph. Edited by R. Hnatyuk, L. Dubis. Lviv: Publishing House of the Ivan Franko National University of Lviv, 90–95. ISBN 978-617-10-0881-6 [in Ukrainian].
10. Goryainov, S. (2024). Transformative possibilities of geological processes. *Visnyk V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (61), 39–54. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-03> [in Ukrainian].
11. Palanychko, O. (2023). Study of the conditions of channel formation of the rivers of the Precarpathian Basin within the alluvial plains. *Problems of geomorphology and paleogeography of the Ukrainian Carpathians and adjacent territories: collection of scientific papers*, 1 (15), 48–65. <http://dx.doi.org/10.30970/gpc.2023.1.3947> [in Ukrainian].
12. Pylypovych, O. V., Kovalchuk, I. P. (2017). *Geoecology of the river-basin system of the upper Dniester: monograph*. Ed. by I. P. Kovalchuk. Lviv-Kyiv: Ivan Franko National University of Lviv [in Ukrainian].
13. Radziy, I., Zayats, I., Tretyak, S. (2018). Research of the Dniester riverbed displacements using GIS technologies. *Modern advances in geodetic science and production*, II (36), 106–113 [in Ukrainian].
14. Rybak, N., Dubis, L. (2024). Morphodynamics of the Sukil. *Morphodynamics of processes in the western region of Ukraine: development and ecological consequences*. Monograph, edited by R. Hnatyuk, L. Dubis. Lviv: Publishing House of Ivan Franko National University of Lviv, 100–109. ISBN 978-617-10-0881-6 [in Ukrainian].
15. Romashchenko, M., Savchuk, D. (2002). *Water elements. Carpathian floods*. Kyiv: Agrarian science [in Ukrainian].
16. Selsky, V., Kovalska, L. (2007). Natural and historical aspect of the formation of the Bystrytsa river bed. *Scientific notes of the Ternopil National Pedagogical University. Series: geography*, 2, 26–30 [in Ukrainian].
17. Susidko, M. M., Polyakova, S. O., Shcherbak, A. V. (2006). Catalog of characteristics of rain and snow-rain floods on the rivers of the Carpathian region for 1989–2002. *Scientific works of UkrNDGMI*, 255, 299–310 [in Ukrainian].
18. Yushchenko, Y. S. (2005). *Geohydromorphological patterns of riverbed development*. Chernivtsi: Ruta [in Ukrainian].
19. Anderson, R. S., Anderson, S. P. (2010). *Geomorphology. The Mechanics and Chemistry of Landscapes*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511794827>
20. *Antropopresja w wybranych strefach morfoklimatycznych – zapis zmian w rzeźbie i osadach*. Praca zbiorowa. (2012). Wydział Nauk o ziemi Uniwersytetu Śląskiego. Sosnowiec. ISBN 978-83-61644-33-0
21. Charlton, R. (2008). *Fundamentals of Fluvial Geomorphology*. London; New York: Routledge. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4762.2009.883.5.x>
22. Fryirs, K. A., Brierley, G. J. (2013). *Geomorphic Analysis of River Systems: An Approach to Reading the Landscape*. A John Wiley & Sons, Ltd., Publication. URL: www.wiley.com/go/fryirs/riversystems
23. Huggett, R. G. (2007). *Fundamentals of geomorphology*. Second edition. NY: Taylor & Francis e-Library. ISBN 0-203-94711-8 Master e-book ISBN.
24. Knighton, D. (1998). *Fluvial Forms and Processes: A New Perspective*, 2nd edition, Oxford: Arnold.
25. Leopold, L. B., Wolman, M. G. & Miller, J. P. (1964). *Fluvial Processes in Geomorphology*, San Francisco, CA: W.H. Freeman.
26. Rybak, N., Dubis, L. (2021). Horizontal deformations of the Sukil riverbed within the Pre-carpathian height in 1880–2019. *Problems of geomorphology and paleogeography of the Ukrainian Carpathians and adjacent territories: collection of scientific papers*, 1 (12), 197–211. <http://dx.doi.org/10.30970/gpc.2021.1.3464>
27. Schumm, S. A. (1977). *The fluvial system*. N.York: John Willy & Sons.

Environmental impacts of urban development and sustainable landscape management: the case of Muratpaşa, Antalya

*Furkan Genişyürek*¹

PhD student (Geography), Department of Geography,

¹ Akdeniz University, Antalya, Turkey,

e-mail: furkangyurek@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0002-8098-1763>;

*Liudmyla Niemets*²

DSc (Geography), Professor, Head of the K. Niemets Department of Human Geography and Regional Studies, ² V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine,

e-mail: liudmila.niemets@karazin.ua,  <https://orcid.org/0000-0001-9943-384X>;

*Mehmet Tahsin Şahin*¹

Assistant Professor, Department of Geography,

e-mail: tahsinsahin@akdeniz.edu.tr,  <https://orcid.org/0000-0003-1012-6814>;

*Kateryna Sehida*²

DSc (Geography), Professor, K. Niemets Department of Human Geography and Regional Studies,

e-mail: kateryna.sehida@karazin.ua,  <https://orcid.org/0000-0002-1122-8460>

ABSTRACT

Problem statement. Intensive urbanization stands out as a phenomenon that significantly affects environmental change and raises serious concerns about the sustainability of cities. The pressure of human activities on ecological areas causes regional ecological networks to shrink and become less connected, leads to increased pollution, deterioration of ecological functions and poses serious threats to the sustainable development of cities. This study comprehensively examines the environmental impacts of urbanization and its consequences on urban landscapes in the Muratpaşa district of Antalya. The research focuses specifically on green space distribution, carbon emissions, and land use changes, assessing how these factors influence sustainable urban development. Muratpaşa, characterized by rapid urbanization and population growth, represents a critical area for environmental and ecological sustainability.

Purpose. The primary aim of the research is to analyze the environmental impacts of urban development in Muratpaşa, to reveal the effects on the urban landscape by using the variables affected in this process, identify land use changes, and make future projections. The study seeks to address inequalities in green space distribution, carbon emissions, and the evolving dynamics of urban landscapes, providing recommendations for sustainable urban planning.

Research methods. The study employed CORINE land cover data, Landsat satellite imagery, the GHG Protocol, artificial neural networks, and Geographic Information Systems (ArcGIS). Analyses included green space evaluation, land use classification, carbon emission calculations, and projections for land use in 2040. Additionally, the distribution of green spaces was analyzed at the neighborhood level based on population density.

Research results. The research reveals a dramatic increase in motor vehicle numbers and carbon emissions in Muratpaşa between 1994 and 2023. During the same period, green spaces declined, while urbanization accelerated. Coastal neighborhoods had higher proportions of green spaces, whereas inland areas showed significantly lower levels. Projections for 2040 indicate further reductions in green spaces and increased urbanization. CORINE data demonstrated that agricultural lands and natural habitats are under significant pressure from urban development.

Conclusion. The Muratpaşa district is at a critical juncture in terms of environmental sustainability. Reducing land use changes, carbon emissions, and inequalities in green space distribution requires the adoption of sustainable urban planning strategies. Preserving green spaces, supporting biodiversity, and minimizing the carbon footprint are essential for achieving comprehensive sustainability policies.

Keywords: sustainability, urban development, urban green areas, land use estimation, carbon emission, ArcGIS, artificial neural network, Muratpaşa, Antalya.

In cites: Genişyürek Furkan, Niemets Liudmyla, Şahin Mehmet Tahsin, Sehida Kateryna (2025). Environmental impacts of urban development and sustainable landscape management: the case of Muratpaşa, Antalya. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (62), 160-172. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-12>

Introduction. In parallel with the rapid increase in the world population and the development of the global economy, the process of urbanization is also progressing rapidly, and urban populations and the size of urban areas are gradually increasing. Every year, more and more people migrate from rural areas to cities, contributing to the increase in the urban population. By 2023, the population of cities and towns was 4.6 billion, and it is projected to reach 5 billion

by 2030 [1]. This intensive urbanization stands out as a phenomenon that significantly affects environmental change and raises serious concerns about the sustainability of cities [2]. Urbanization is a complex process shaped by the expansion of urban areas, economic use of land, transfer of rural labor to cities, and economic growth [3]. However, the growth of cities and the expansion of urban impervious surfaces have negative impacts on air quality, land use, water reso-

urces, biodiversity and climate [4-9]. In particular, the pressure of human activities on ecological areas causes regional ecological networks to shrink and become less connected [10]. This leads to increased pollution, deterioration of ecological functions and poses serious threats to the sustainable development of cities [11, 1]. In this context, the pressures of urbanization on the natural environment have led to the concept of *resilient cities*, which requires increasing the resilience capacity of cities [12], including new relevance for the study of emerging urban resilience in Ukraine [49]. However, for a long time, the science has paid limited attention to the environmental problems of cities and therefore has not been able to contribute sufficiently to the environmental impacts on urban landscapes [13, 14]. The rapidly increasing number and area size of cities has increased the need for urban ecology studies since the 2000s [15, 16]. Nevertheless, studies that address the impacts of urbanization on the natural environment in a holistic manner are still limited.

Many studies in the literature have generally addressed the environmental impacts of urbanization independently of each other and have examined the interrelationship of these impacts in a limited way. For example, one study emphasized that urbanization strengthens dependence on fossil fuels by increasing the number of automobiles and as a result, the carbon footprint grows, focusing on the difficulties in the recovery of natural resources [17, 3]. In another study, it was stated that 16% of carbon emissions worldwide originate from the transportation sector [18, 5]. In another study, they analyzed black carbon and particle number concentrations between different years according to vehicle types in Stockholm in order to measure the effectiveness of European Carbon Emission Reduction policies [19]. A similar study examined the effects of smart transportation policies on carbon emission reduction in 258 cities in China using a quasi-natural experimental method [20]; they evaluated the impact of coal use in transportation on carbon emissions and found that efficient use of coal has a strong relationship with emissions [21, 22].

The effects of urbanization on green spaces have also been widely discussed. In one study, it was stated that the reduction and fragmentation of green areas is inevitable with urbanization [23], while in Paris, changes in vegetation cover were shaped by social policies [24]. The original integrated approach using urban remote sensing (URS) and GIS for changes detection to evaluate the current state and monitor spatial transformations of the urban green spaces in Kharkiv (Ukraine) represented [51]. Some methodical issues of geoinformation approach to the urban geographic system research [50] and features of using GIS & remote sensing for sustainable land use [52] developed from the perspective of geographical

science and tested on different case studies. In China, it was also emphasized that increasing urban population density and non-agricultural working population significantly affect the distribution of green areas [25]. In addition, a study conducted in the Nanjing metropolitan area using Landsat imagery between 2000 and 2020 determined that the distribution of green areas is affected by a combination of physical geography, socio-economic structures and management policies [3]. It has also been shown that economic development and vegetation improvement can be possible simultaneously with sustainable policies [8]. The effects of urbanization on climate have been associated with the increase in the areal extent of impervious surfaces and surface temperatures. A study analyzed the impact of urban expansion on climate change through surface temperatures, NDVI, NDBI and MNDWI indices using Landsat 5 TM and Landsat 8 OLI data between 1992-2021 and found a positive correlation between the size of impervious surfaces and surface temperatures [26]. In addition, a similar study revealed a strong negative correlation between NDVI and surface temperatures [27].

These studies reveal the importance of addressing the environmental and climatic impacts of urbanization in a more holistic manner. In this context, this research has been applied in Muratpaşa district, the central district of Antalya city, which is a rapidly growing and especially an important tourism center. Evaluated in 4 different categories, Muratpaşa district is based on the impact of ecology on the urban landscape. The aim of the research is to comprehensively analyze the environmental impacts of urban development in Muratpaşa district and to reveal the effects on the urban landscape by using the variables affected in this process. In this context, Antalya/Muratpaşa district's vehicle carbon emissions by years, the distribution of green areas at the neighborhood scale, land use analysis, future situation estimation and Corine analysis were conducted. The study aims to identify the unique characteristics of Muratpaşa district by analyzing the pressures on the urban environment in detail and to provide new findings to the literature.

Material and methods. The methods used in this study were selected to comprehensively analyze the environmental impacts of urban development in Muratpaşa district. The GHG Protocol was chosen for carbon emission calculations in accordance with international standards [28-32]; CORINE land cover data was chosen to monitor long-term and detailed land use changes [33-35]; Landsat 8 OLI-TIRS satellite imagery was chosen to provide high-resolution spatial analysis; and the green space analysis method was chosen to understand the relationship between population density and environmental equity [36-39]. For the future land use prediction in Muratpaşa, the Artificial Neural Network method, the accuracy of

which has been proven in many studies, was applied and the estimated land use map of 2040 was made [40, 41]. These methods increase the scientific reliability of the study and allow both local and international comparisons.

Calculating carbon emissions. Within the scope of the purpose of the study and the variables obtained, the method was carried out in 4 stages. The first stage of the study was conducted to understand the relationship between the number of motorized land vehicles in Muratpaşa district of Antalya and their environmental impacts. During the research process, the Turkish Statistical Institute (TUIK) collected the motorized land vehicle data of Antalya between 1994 and 2023. This data was used to determine the change in the number of vehicles in the district over time. Then, the population ratios of Muratpaşa district with other districts were calculated and these ratios were divided by the number of vehicles to determine the average number of vehicles in the district between 1994 and 2023. Then, the average carbon dioxide emission of vehicles in Muratpaşa district was calculated by formulating the number of vehicles with the most up-to-date 2023 carbon emission rates of the GHG Protocol. The main reason for choosing the GHG Protocol is that it enables greenhouse gas emissions to be calculated within the framework of a global standard. In this way, the carbon footprint data of the district was analyzed in accordance with international comparisons [42-44, 6]. These steps are an appropriate method to analyze how the number of vehicles is related to population and environmental factors and to understand the environmental impacts of transportation in the district. The main reason for using the GHG Protocol in this process is to measure environmental impacts in a standardized way and to obtain comparable data [45]. The GHG Protocol is recognized as a global standard for calculating and reporting greenhouse gas emissions. This protocol provides a comprehensive framework for calculating and reporting GHG emissions according to a specific process and methodology. Therefore, the use of the GHG Protocol has enabled the identification of carbon dioxide emissions of vehicles in Muratpaşa district and a clear measurement of environmental impacts. Thus, calculating GHG emissions and relating these emissions to population and vehicle numbers will contribute to understanding the environmental impacts of the district and guide future landscaping sustainability efforts. The detection of carbon dioxide emissions from vehicles is an important element that increases the reliability and comparability of the research [46, 24].

Calculation of parks and green areas. Another stage of the study is the collection and analysis of park and green area data in the neighborhoods within the borders of Muratpaşa district. First, neighbor-

hood-based park and green area data were obtained from Muratpaşa Municipality. This data includes the square meters of parks and green areas in each neighborhood. Then, the total square meters of parks and green areas in each neighborhood were divided by the number of population in that neighborhood to determine the average park and green area per capita. The purpose of this step is to determine how the area of parks and green spaces, which have psychological effects on people and environmental aesthetic value, is distributed according to the population density in each neighborhood [12, 14, 18]. In terms of landscape architecture, the amount and distribution of green spaces in neighborhoods can directly affect the quality of the urban environment and people's quality of life. Therefore, determining the amount of parks and green spaces per capita can provide important data to be used in urban planning and landscape design. The determined data will provide a basis for analyzing and improving the urban landscape in Muratpaşa district, and the ratio of the amount of green space to the population will also guide the sustainability efforts of the district and the determination of green space policies [47].

Digitization of land cover data. In another phase of the study, CORINE data for the years 1990, 2000, 2006, 2012 and 2018 published by Copernicus Land Monitoring Service were used [24, 34]. The use of CORINE data was preferred because it provides reliable land cover data based on European Union standards [8]. CORINE data is a detailed and reliable source covering land cover over various periods. These data are an important basis for understanding and monitoring land use in and around Muratpaşa district of Antalya province. CORINE land cover classes were used to classify the study area according to the characteristics of each year and the legends were prepared accordingly. This classification defines various land types and plays an important role in determining the changes that have occurred over the years [2, 45]. Using the Geographic Information Systems software ArcGIS 10.8.1, the 1990, 2000, 2006, 2012 and 2018 land cover data of Muratpaşa district and its surroundings were digitized and mapped. Thanks to this digitization process, the land use of each year can be analyzed in detail. The data obtained will contribute to the understanding of landscape changes in the region by calculating and tabulating the area covered in square kilometers for each year. The use of CORINE data can provide urban planners and environmental experts with an important basis for improving various aspects of the landscape, such as urban regeneration projects and the protection of green spaces [2, 8].

Land use classification and future forecasting. In another stage of the study, Landsat 8 OLI-TIRS (Operational Land Imager and Thermal Infra-

red Sensor) satellite images of 2013 and 2023, which have low cloudiness, were preferred by the United States Geological Survey (USGS) to classify the land use of Muratpaşa and its surroundings in detail and to predict future land use (Table 1) [16, 31, 33, 40]. In order to clearly reveal the change between the two years, a 10-year period was determined between the image acquisition dates and Landsat 8 OLI-TIRS satellite image was preferred because the image quality should be good in the analysis to be performed. In order to obtain the natural appearance of Muratpaşa and its surroundings, a combination of Red, Green and Blue bands was made using ArcGIS 10.8.1. In the natural view formed with the Classification tool, a sample group was formed in 4 classes. These are Forest, Plant-Agriculture Land, Build Up Area and Bare Land. For each sample, 50 samples were taken from the study area and detailed land use maps of 2013 and 2023 were created with the Interactive Supervised Classification analysis in the Classification

tool [16].

In addition to the land use data for the years 2013 and 2023 obtained as a result of the analyzes made with ArcGIS 10.8.1, Digital Elevation Model (DEM), road data and river data of Muratpaşa and its surroundings were integrated into QGIS 2.18 software, another Geographic Information Systems software, by installing Molusce plug-in. Finally, by applying the Artificial Neural Network method, the estimated land use map of Muratpaşa and its surroundings for the year 2040 was created. The accuracy of this map was compared with TerrSet Geospatial Monitoring and Modeling Software, another Geographic Information Systems software, and positive results were obtained [44, 46-48].

The findings from these four phases will provide important information in a wide range of perspectives, from the environmental impacts of motor vehicles in Muratpaşa district to the distribution of green space, from land use changes to future land use pro-

Table 1

Metadata of Landsat 8 OLI-TIRS satellite imagery

Satellite Image	Image Number	Shooting Date	Path/Row	Format
LANDSAT 8 OLI-TIRS	LC81780342013117LGN02	2013.04.27	178-034	GeoTiff
LANDSAT 8 OLI-TIRS	LC81780342023257LGN00	2023.09.19	178-034	GeoTiff

jections. This information will shed light on the development of a district's environmental sustainability policies, the improvement of urban planning processes and the formulation of long-term environmental management strategies.

Findings. Table 2 shows that the number of cars has increased dramatically in Antalya Muratpaşa district since 1994. The increase in the mobility needs of individuals and businesses in parallel with population growth is the most important reason for the number of cars. The rise in income levels due to population growth and economic development, which are especially characteristic of developing countries, has enabled more people to own cars. For this reason, the number of vehicles, which has a significant impact on urban ecology, affects the urban landscape depending on air and environmental quality. The carbon dioxide emissions in Muratpaşa District between 1994 (33084585.83 KG) and 2023 (247515903.57 KG) showed an increase every year in parallel with the increase in the number of vehicles (Table 2). Although there is a decreasing trend in carbon emissions per vehicle, the total carbon emissions increasing every year is a major threat to future generations and the urban landscape. The number of Minibuses, another transportation node, has generally increased over the years observed between 1994 (704) and 2023 (3844). This increase can be attributed to factors such as

increased need for public transportation, urbanization and population growth. Increasing population density and transportation needs in cities, especially in developing countries, have increased the demand for minibuses. However, it is noteworthy that carbon emissions per minibus fluctuate between 1994 (1551852.95 KG) and 2023 (8473569.83 KG). The reason for these fluctuations is that older and less efficient van models are still in use in certain years. However, there has been a general upward trend in the carbon emissions of minibuses in recent years. This increase is due to the fact that minibuses usually have diesel engines and less efficient technologies. The number of buses in Muratpaşa district increased dramatically between 1994 (496) and 2023 (2277). This can be attributed to the increase in the district's population and transportation demand. Especially in a touristic region like Antalya, the development of transportation infrastructure and the expansion of public transportation services lead to more widespread use of buses. There is a significant increase in the average carbon emissions of buses in Muratpaşa district between 1994 (1092836.48 KG) and 2023 (5018580.09 KG) (Table 1).

This increase is a result of the transportation demand in the district and the growth of bus fleets. Between 1994 (3094) and 2023 (43557), there is a significant increase in the number of pickup trucks in

Table 2

The amount of carbon emitted by cars, minibuses, buses, vans, trucks, trucks
and motorcycles in Muratpaşa district between 1994-2023

Avg. Carbon (KG)	Motorcycle	Avg. Carbon (KG)	Truck	Avg. Carbon (KG)	Van	Avg. Carbon (KG)	Bus	Avg. Carbon (KG)	Minibus	Avg. Carbon (KG)	Car	Years
14732994.97	11836	12893934.92	1833	15320454.18	3094	1092836.48	496	1551852.95	704	33084585.83	16956	1994
15422709.13	12390	13322082.60	1893	17510570.12	3536	1229912.63	558	1679706.85	762	37687458.61	19315	1995
16319526.88	13111	13976345.77	1986	20207256.30	4081	1388786.82	630	1858702.32	843	42085157.40	21569	1996
17480017.10	14043	14587794.18	2073	24681646.21	4984	1494842.68	678	2102253.52	954	46787463.51	23979	1997
18316242.26	14715	15385219.23	2187	29206881.46	5898	1587065.17	720	2322329.91	1053	50396374.00	25829	1998
19064655.49	15316	15307617.46	2176	30988351.52	6258	1561075.20	708	2415809.98	1096	51840012.40	26569	1999
20061119.67	16117	16047510.17	2281	34584246.95	6984	1701924.09	772	2684931.97	1218	56438061.93	28925	2000
20903972.14	16794	16345875.58	2323	37328953.72	7539	1825166.87	828	2823265.70	1281	59389525.17	30438	2001
21594159.68	17348	16961337.87	2411	41147062.12	8310	1972303.65	895	2985912.63	1354	63087480.44	32333	2002
22613109.38	18167	17586165.89	2499	46762647.44	9444	2071233.23	940	3154428.26	1431	67131968.28	34406	2003
27090334.15	21764	23204266.20	3298	57658615.47	11644	2410779.66	1094	3939157.79	1787	74044439.89	37949	2004
33815402.20	27167	24358926.97	3462	67106432.89	13552	2615765.10	1187	4435901.65	2012	81240741.72	41637	2005
40977399.68	32921	25465421.13	3619	76390415.33	15427	2656846.03	1205	4705023.63	2134	86755581.40	44463	2006
44531534.12	35776	26458188.56	3760	85696054.11	17306	2857639.53	1296	4954862.74	2248	91997721.46	47150	2007
48133243.22	38670	26792678.93	3808	93078985.78	18797	3342226.78	1516	5058822.63	2295	97517013.37	49979	2008
50347949.93	40449	25620624.66	3641	98476124.46	19887	3301145.86	1497	5018999.28	2277	101752947.48	52150	2009
51799568.64	41615	25628652.43	3642	106385399.56	21485	3522899.02	1598	5031155.89	2282	107959368.24	55331	2010
53818532.86	43237	25438661.90	3615	115435870.06	23312	3811723.08	1729	5181646.22	2350	117563218.15	60253	2011
55938563.64	44940	26420725.64	3755	123986361.39	25039	4134082.60	1875	5318722.37	2413	126479939.22	64823	2012
57235623.89	45982	26290943.37	3737	130882496.01	26432	4114380.52	1866	5476338.98	2484	136333114.50	69873	2013
59183344.48	47547	27442928.22	3900	139164636.94	28104	4220017.19	1914	5204282.65	2361	146095018.88	74876	2014
61161834.74	49137	29091296.78	4134	150535161.47	30401	4328588.21	1964	5470889.47	2482	157477909.18	80710	2015
62142204.01	49924	30098781.79	4278	158764573.89	32063	4310562.90	1955	5503586.54	2497	166430990.20	85298	2016
63879744.03	51320	30921628.11	4395	166685147.96	33662	4453088.57	2020	5764324.66	2615	177101151.28	90767	2017
65960484.30	52992	31319002.67	4451	172233881.07	34783	4546149.44	2062	6141598.47	2786	185146717.64	94890	2018
68571646.47	55089	31872918.73	4530	177132923.73	35772	4655558.85	2112	6611094.77	2999	193004176.92	98917	2019
71525535.51	57463	33247005.18	4725	185418830.98	37446	4652624.49	2111	6830751.97	3099	205021511.23	105076	2020
75426183.86	60596	34972975.51	4970	194234847.97	39226	4645079.02	2107	6912913.82	3136	216344296.30	110880	2021
84802651.35	68129	37176598.09	5284	205583716.16	41518	4787604.68	2172	7481339.70	3394	230962109.03	118371	2022
100969513.30	81117	38992211.84	5542	215681224.03	43557	5018580.09	2277	8473569.83	3844	247515903.57	126855	2023

Muratpaşa district (Table 2). This increase is due to the need for commercial transportation and logistics requirements, along with the increase in the population and commercial activities of the district. Especially in the Muratpaşa district of Antalya, which is a touristic region, the increase in touristic activities and the expansion of the service sector have increased the demand for pickup trucks. Between 1994 (15320454.18 KG) and 2023 (215681224.03 KG), the average carbon emissions of pickup trucks in Muratpaşa district also increased (Table 2). This increase can be attributed to the fact that pickup trucks usually run on fossil fuels, increasing the carbon footprint of commercial transportation activities. Especially in the district, which is a touristic destination, intensive tourist and material transportation causes carbon emissions to increase. The number of trucks in Muratpaşa district increased significantly between 1994 (1833) and 2023 (5542), as did the number of vans (Table 2). In this period, with the increase in commercial activities and logistics needs, it is seen that the demand for trucks has increased in addition to vans. The fact that the district is a touristic region and the increase in activities in the construction sector also create an additional demand for trucks. Between 1994 (12893934.92 KG) and 2023 (38992211.84 KG), the average carbon emissions of trucks in Muratpaşa district also increased (Table 2). This increase can be attributed to the fact that trucks generally run on fossil fuels, increasing the carbon footprint of commercial transportation activities. Construction activities, material transportation and logistics requirements in the district have also increased carbon emissions, but the continued use of old trucks also contributes to the increase in carbon emissions. The number of motorcycles in Muratpaşa district increased significantly between 1994 (11836) and 2023 (81117). In this period, it is observed that the use of motorcycles increased as a result of the effects of individuals' personal transportation preferences, changes in transportation infrastructure and the city's climate being suitable for motorcycling. In particular, the intensity of urban transportation and traffic problems can also affect individuals' preference for motorcycles. The average carbon emission of motorcycles in Muratpaşa district has shown an increasing trend between 1994 (14732994.97 KG) and 2023 (100969513.30 KG) (Table 2). This increase is accompanied by an increase in the use of motorcycles, and it is inevitable that carbon emissions will increase as more motorized vehicles circulate on the roads.

Table 2 shows that the increase in the number of vehicles and the related increase in carbon emissions is an important trend that should be taken into account in terms of transportation and environmental policies of Muratpaşa district. These increases are likely to have emerged with the growth of the

population and economy of the district. However, the increasing number of vehicles and carbon emissions are a major concern in terms of environmental sustainability and urban landscape.

There are 55 neighborhoods in the Muratpaşa district of Antalya province. When we look at Fig. 1, we see the distribution of green areas (park areas) at the neighborhood scale of Antalya Muratpaşa district. When Fig. 1 is examined, it is seen that green areas are concentrated close to the coast. The 10 neighborhoods that do not have green areas are located in neighborhoods far from the coast of Muratpaşa district (Fig. 1).

One of the most important dynamics in urban landscape is the green area per capita in the city. In this context, the square meter area per capita was found by proportioning the green areas to the neighborhood population at the neighborhood scale of Muratpaşa district. Fig. 2 shows the square meter green area per capita at the neighborhood scale. According to the analysis, the ratio of green space per capita is high in the neighborhoods close to the sea, while this ratio is low in the neighborhoods in the inner parts of the district. There are no green areas in 10 neighborhoods in Muratpaşa district. Neighborhoods with no data are shown in white on Fig. 2. The 5 neighborhoods with the least park area per capita are Yıldız (0.24 m²), Güvenlik (0.26 m²), Yüksekalan (0.45 m²), Gebizli (0.46 m²) and Varlık (0.55 m²). The 5 neighborhoods with the highest park area per capita are Selçuk (256.19 m²), Kılınçarslan (190.96 m²), Meltem (58.40 m²), Bahçelievler (18.31 m²) and Şirinyalı (12.93 m²) (Fig. 2). According to the Spatial Plans Construction Regulation of the Zoning Law No. 3194, the average green area per capita in Turkey is 10 m². Accordingly, 6 neighborhoods were observed in Antalya-Muratpaşa district that comply with the regulation (Selçuk, Kılınçarslan, Meltem, Bahçelievler, Şirinyalı and Çağlayan).

CORINE (Coordinated Information on the Environment) is a program developed by the European Union that aims to collect, process and share environmental information. CORINE enables the use of a database covering various environmental topics such as land use, land cover and natural habitats to reveal the status of the region in 1990, 2000, 2006, 2012 and 2018. Looking at the distribution of artificial surface and urban structure of Antalya/Muratpaşa district in 1990 using the Corine Land Cover Classes program, agricultural lands irrigated by irrigation canals and irrigation ponds are concentrated in the center and east of the district. Dryland agricultural lands are generally located in the east and north of Muratpaşa district. In these lands, mostly cereals and legumes are grown. Lands with fruit trees are located in the north of Muratpaşa. In these areas, citrus fruits, grapes and figs are generally grown. Broad-leaved forests are

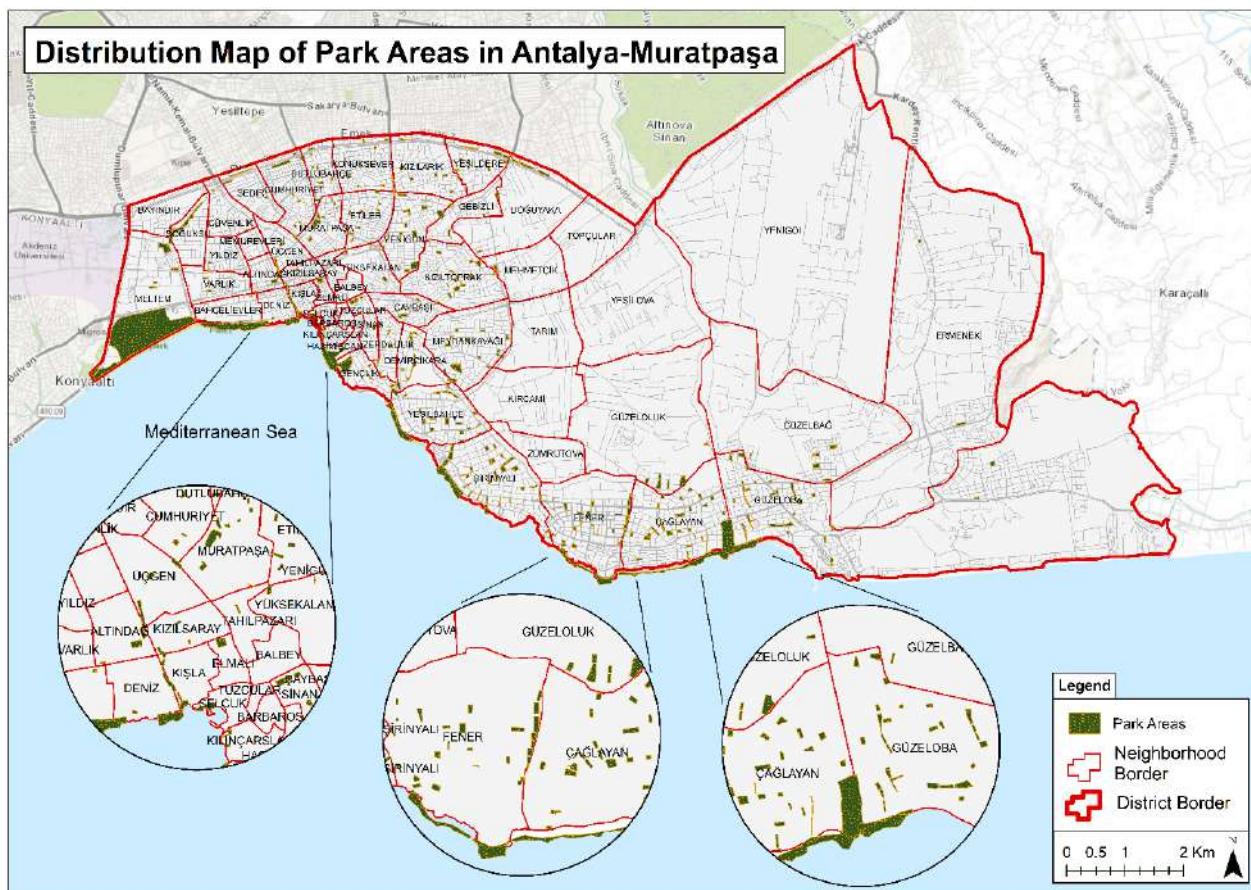


Fig. 1. Antalya/Muratpaşa district Green Area Distribution

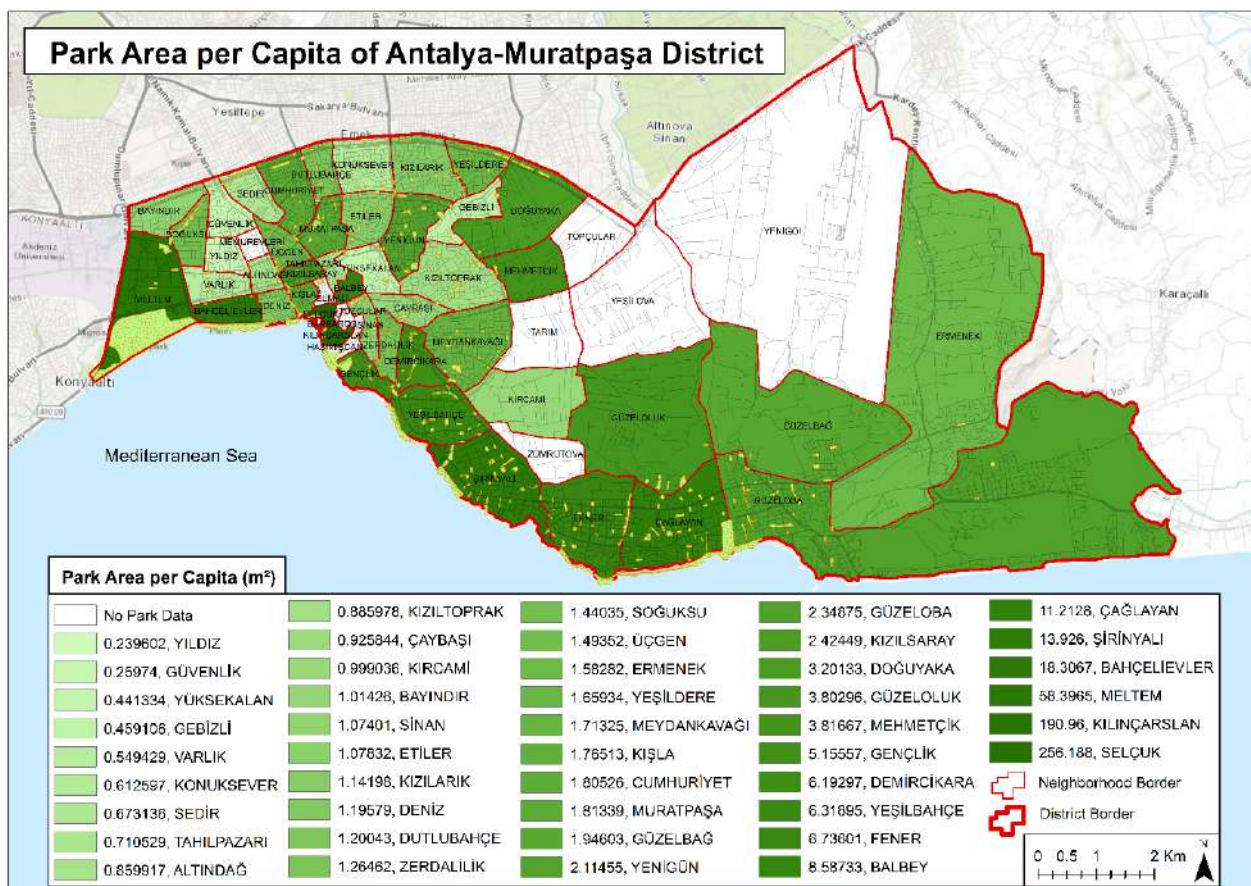


Fig. 2. Per capita green area (m²) at the neighborhood scale in Antalya Muratpaşa district

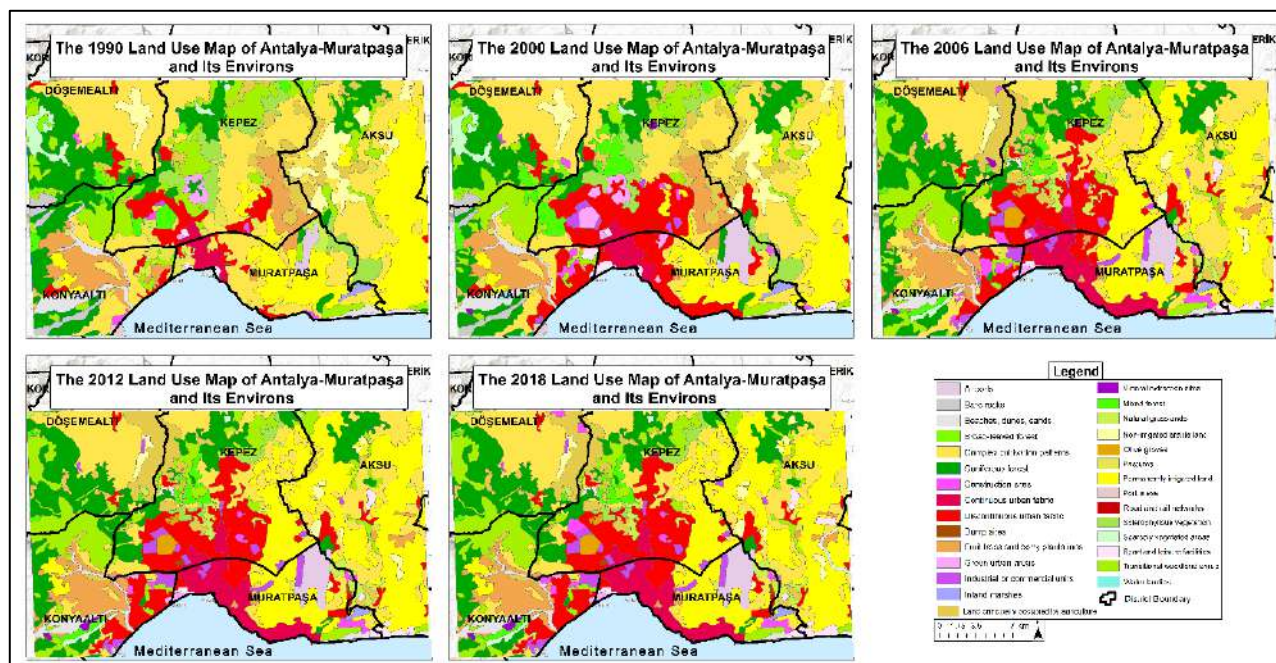


Fig. 3. CORINE land use maps of Antalya Muratpaşa district and its immediate surroundings by years

seen in the coastal area in the southeast of Muratpaşa district, while coniferous forests are seen in the north-eastern part of the district. In 1990, continuous urban construction is located in the center of the district.

Looking at the 2000 land use map, it is seen that there is an increase in continuous urbanization in Muratpaşa district. Around the continuous urbanization, the area of discontinuous urbanization has expanded and moved inland from the south of Kepez district. However, discontinuous urban development has increased along the coastal area of Muratpaşa district. No change was observed in the broad-leaved trees in the southeast of Antalya, while the area of coniferous forest in the northeast expanded. Some of the continuously irrigated agricultural land has been degraded and used as an airport.

By 2006, there was an increase in the area of permanently irrigated agricultural land. Although there is not much change in Muratpaşa district, there are increases in Aksu district in general and in the intersection of Muratpaşa district in the southeast of Kepez district. In contrast to 2000, the area of continuous urbanization continues to expand along the coast. Discontinuous urbanization, on the other hand, has moved to the east of Muratpaşa district, towards the outskirts of the city, and has continued to expand north towards Kepez district. The coniferous forest area in the northeast of Muratpaşa district has been converted into a mining area.

In 2012, there was not much change in the area of permanent urban development, but discontinuous urban development continued to expand. Although it increased in the north of Muratpaşa district, it moved from the south to the center of Kepez district and started to gain a foothold in the southeast of Kony-

aaltı district. There is a slight increase in permanently irrigated agricultural areas north of Aksu district and east of Kepez district. However, in the surrounding districts, mixed forest areas and broad-leaved forest areas have been destroyed with the expansion of construction.

In 2018 (Fig. 3), no change was observed in Muratpaşa district. An increase in construction sites was observed in Kepez, Döşemealtı and Konyaaltı. Coniferous forests in the north of Aksu and continuously irrigated agricultural areas in the east have been destroyed.

The anthropological impact of urban greenery in the Muratpaşa district of Antalya and its immediate surroundings in 2013 is divided into 4 main categories: Forest, Plant-Agricultural Area, Building Area, Bare Land. It is seen that Muratpaşa district, located in the north of the Gulf of Antalya, is densely urbanized. Built-up areas, shown in gray, constitute the largest part of the city. Built-up areas contain urban functions such as housing, workplaces and infrastructure. Plant-agricultural areas, shown in light green, are concentrated in the north and east of Muratpaşa district. These areas provide food and agricultural products to the city. They also function as green areas. Forested areas, shown in dark green, are located in the north and southeast of the district. Forests help to improve the district's air quality, reduce noise pollution and protect biodiversity. Bare land, shown in white, is located in the northeast of the district. Looking at the immediate surroundings of Muratpaşa district, Döşemealtı district has the most forests and plant-agricultural areas. In Aksu district to the east, there are more plant-agricultural areas (Fig. 4).

In 2023, the plant-agricultural areas in Murat-

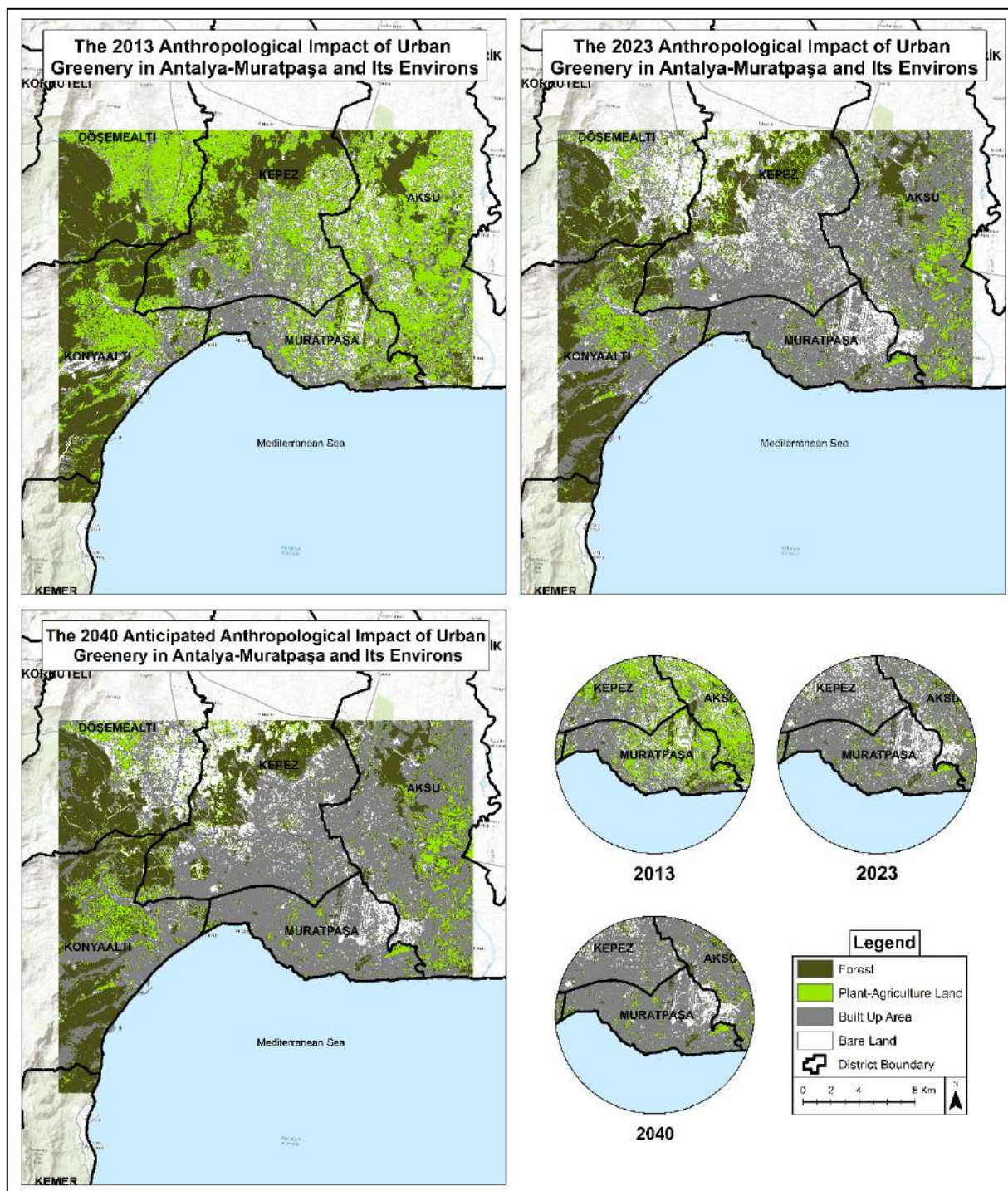


Fig. 4. Land Use Maps of Antalya/Muratpaşa and its immediate surroundings (2013-2023 and 2040)

paşa district have been visibly reduced and transformed into bare land and building areas. The building area has spread dramatically compared to 2013 and increased its density in the center and eastern parts of the district. In 2023, it is seen that forest areas decreased in the southeast of Muratpaşa district. Looking at the neighboring districts of Muratpaşa district, it is observed that plant-agricultural areas in Aksu are mostly converted into building areas, while the northern parts of Kepez district are converted into bare land, while the eastern parts are converted into building areas. In Döşemealtı and Konyaalti districts,

plant-agricultural areas were transformed into construction areas, while no significant change was observed in forested areas.

Looking at the 2040 land use projections, it is seen that the bare land in Muratpaşa district will continue to be converted into building areas (Fig. 4). It is seen that the green areas in the district center will be further destroyed and opened to construction, while the city center will be covered with concrete. By 2040, a significant decrease in forest areas is expected. This reduction will occur due to the expansion of urbanization and the contraction of agricul-

tural activities. It is observed that the remaining forest will be located in a small area in the southeast of Muratpaşa, i.e. outside the district center. The situation is similar in the surrounding districts. With the expansion of building areas, it is estimated that there will be a contraction in bare land and agricultural-vegetation areas.

Discussion. The results of this study, which comprehensively examined the ecological dynamics of the urban landscape in the Muratpaşa district of Antalya, reveal the critical role of ecological elements on sustainable urban development. The findings of the study are in line with some studies with similar content, which emphasize the limits of the potential to reduce carbon emissions [22, 25, 37]. The significant increase in transportation-related carbon dioxide emissions in Muratpaşa in the last 20 years due to the increase in private vehicle use points to a serious problem in terms of carbon management. Analyses of transportation-related carbon dioxide emissions have revealed that the increase in the number of motor vehicles contributes to air pollution and climate change in Muratpaşa [11, 14, 28, 47, 48]. These studies emphasized that motorized vehicle use in urban areas has negative impacts on health and the environment, causing air pollution and greenhouse gas emissions. Sustainable transportation systems, public transport infrastructure and transition to alternative energy sources can contribute to the reduction of transportation-related emissions in Muratpaşa. In addition, this trend can also be associated with the findings of studies on automobile dependency and sustainable transportation. They also emphasized that the increase in private vehicle use not only creates environmental impacts but also negatively affects energy efficiency [28]. Our study supports these findings and shows that emissions from transportation contribute significantly to air pollution and climate change. In this context, it is once again clear that public transportation systems should be improved, bicycle lanes should be encouraged and sustainable transportation strategies should be implemented.

The results obtained from CORINE land cover data reveal that artificial surfaces are increasing in Muratpaşa, while agricultural areas and semi-natural areas are decreasing. These findings can be related to studies on urban landscape ecology; emphasizing the pressure of urban development on natural areas, we can say that sustainable landscape planning plays a critical role to prevent these negative trends [38]. Land use maps in Muratpaşa show that between 2013 and 2023, built-up areas increased while forest and vegetation cover decreased. Projections for 2040 indicate that this trend will continue. These findings are in line with similar studies. In these studies, they emphasized that urban development causes fragmentation of natural areas, habitat loss and reduction in

biodiversity. Similarly, they support the idea that the decrease in green areas in Muratpaşa may lead to a threat to biodiversity [21, 24, 30, 41, 42, 47]. Some studies on land use changes show that the impacts of human activities on land cover can lead to loss of ecosystem services and weaken environmental sustainability. The findings of our study, in this respect, concretely demonstrate the pressure of urban development on natural areas and point to the vital importance of sustainable land use planning to reverse this trend [10-12, 15, 32, 48].

The fact that the amount of parks and green areas per capita in Muratpaşa shows significant differences between neighborhoods points to inequalities in the distribution of green areas [9, 42]. The fact that the amount of parks and green spaces per capita differs on a neighborhood basis in Muratpaşa is in line with the studies conducted. These studies emphasized that equal distribution of green spaces is important for human health, welfare and environmental justice. The lack of green areas in some neighborhoods in Muratpaşa can be considered as a deficiency in this sense [5, 7, 12, 29, 34]. Fair distribution and accessibility of green spaces should be taken into consideration in the urban landscape planning process. Similarly, in another study on biodiversity and green space access in urban ecosystems, it was stated that inequalities in access to green spaces may have negative effects on social welfare [43]. Our study showed that access to green space in some neighborhoods in Muratpaşa is quite limited and only six neighborhoods meet the legal per capita green space standard. This clearly demonstrates the need to prioritize green space distribution in planning processes for sustainable urban development and the importance of integrating the principles of social justice and environmental sustainability.

The results obtained from the settlement forecast maps, where the anthropological impact was analyzed, show that the built-up areas in Muratpaşa will increase significantly by 2040 and this increase will create serious pressures on existing green areas and natural habitats. This finding can be related to studies evaluating urbanization and ecological systems; it can be said to confirm the conclusion that rapid and uncontrolled urbanization leads to disruption of ecological balance, loss of biodiversity and transformation of ecosystem processes [41]. The fact that anthropological impacts will limit landscape studies in the future and green areas may disappear is in line with studies on a similar subject. These studies emphasized that urban development leads to fragmentation of natural areas, habitat loss and reduction of biodiversity. The predicted development trend in Muratpaşa may lead to similar results. Sustainable urban planning, preservation of green areas and protection of sensitive natural areas are of great importance in

preventing these negative impacts. It is also in line with the findings that dense development threatens the ecological balance by suppressing natural habitats and causes loss of biodiversity [16, 26]. Our study predicts that a similar scenario will occur in Muratpaşa if the current development trends continue and emphasizes once again the importance of sustainable planning policies that take into account ecological dynamics in order to reverse these negative trends.

The findings of this study clearly reveal that ecological factors should be taken into account for the sustainability of urban areas, quality of life and ecological balance. Conservation of green areas, afforestation efforts, sustainable transportation systems and transition to alternative energy sources can be among the strategies that will serve this purpose. However, it is also important to continuously monitor and evaluate the relationship between ecological factors and the urban landscape.

Conclusion. This study has comprehensively examined the ecological dynamics in the urban landscape of the Muratpaşa district of Antalya and has scrutinized the role of ecological factors. The findings clearly demonstrate that ecological factors are vital for sustainable urban development. CORINE land cover data shows that during the 1990-2018 period, artificial surfaces have increased in Muratpaşa, while agricultural areas and semi-natural areas have decreased. This situation concretely reflects the pressure of urban development on natural areas. Protecting green areas, adopting appropriate landscape design strategies and sustainable land use planning can contribute to reversing this negative trend [38]. It has been determined that carbon dioxide emissions from transportation in Muratpaşa have increased significantly in the last 20 years. The main reason for this increase is the high rate of increase in private vehicle use. The results of the analysis show that the increase in the number of motor vehicles directly contributes to air pollution and climate change [22, 25]. Another

result of the study revealed that the amount of parks and green spaces per capita in Muratpaşa varies significantly on a neighborhood basis. While some neighborhoods have very limited access to green space (there are only 6 neighborhoods that comply with the green space per capita provision deemed sufficient by law), some other neighborhoods have higher amounts of green space. This points to inequality in the distribution of green space in the region. In addition, the settlement forecast maps, where the anthropological impact is analyzed, show that the built-up areas in Muratpaşa will increase significantly by 2040. This increase is projected to put pressure on existing green areas and natural habitats. If future development continues uncontrolled, there is a risk that the ecological balance of the region will be seriously disrupted [24].

Research findings clearly show that urbanization creates environmental impacts such as loss of natural areas, carbon emissions from transportation and green space inequalities. In particular, the increase in artificial surfaces and the decrease in green areas have led to a deterioration in ecological balance, and projections for 2040 indicate that these negative trends will continue. As a result, adopting sustainable urban planning strategies, protecting natural areas and strengthening green infrastructure in Muratpaşa are of fundamental importance in reducing environmental impacts. In this context, our findings are important for local governments and decision makers to adopt a holistic planning approach that considers environmental, social and economic balances. Local governments, non-governmental organizations, academia and the public working in cooperation to implement these recommendations will make significant contributions to ensuring the ecological sustainability of Muratpaşa. Thus, the environmental quality of the region will be improved, the quality of life will be increased, a healthier urban heritage will be left to future generations and a sustainable urban environment will be created.

References

1. He, H. Z. (2003). *The development trend of world urbanization*. *Intell. Build. City Information* 4, 74-75.
2. Andersson, E. (2006). *Urban landscapes and sustainable cities*. *Ecology and Society* 11(1): 34.
3. Liu, W., Li, H., Xu, H., Zhang, X. & Xie, Y. (2023). *Spatiotemporal distribution and driving factors of regional green spaces during rapid urbanization in Nanjing metropolitan area, China*. *Ecological Indicators*, 148, 110058. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110058>
4. Landsberg, H. E. (1981). *The urban climate*. Academic Press.
5. Newbold, T., Hudson, L. N., Hill, S. L., Contu, S., Lysenko, I., Senior, R. A., ... Purvis, A. (2015). *Global effects of land use on local terrestrial biodiversity*. *Nature*, 520(7545), 45-50. <https://doi.org/10.1038/nature14324>
6. 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*. *Geology Geography Ecology*, 61, 392-398. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-31>
7. Dadashpoor, H., Azizi, P. & Moghadasi, M. (2019). *Land use change, urbanization, and change in landscape pattern in a metropolitan area*. *Science of Total Environment*, 655, 707-719. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.267>
8. Hu, M. & Xia, B. (2019). *A significant increase in the normalized difference vegetation index during the rapid economic development in the Pearl River Delta of China*. *Land Degrad. Dev.* 30, 359-370. <https://doi.org/10.1002/ldr.3221>

9. An, Y., Liu, S. L., Sun, Y. X., Shi, F. N. & Beazley, R. (2021). Construction and optimization of an ecological network based on morphological spatial pattern analysis and circuit theory. *Landscape Ecology*, 36, 2059-2076. <https://doi.org/10.1007/s10980-020-01027-3>
10. Aminzadeh, B. & Khansefid, M. (2010). A case study of urban ecological networks and a sustainable city: Tehran's metropolitan area. *Urban Ecosystem*, 13, 23-36. <https://doi.org/10.1007/s11252-009-0101-3>
11. Abdul-Manan, A. F. N. (2021). How to avoid a climate disaster, by bill Gates. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 40, 60-61. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2021.05.004>
12. Garmestani, A. S., Allen, C. R., & Gunderson, L. H. (2009). Panarchy: discontinuities reveal similarities in the dynamic system structure of ecological and social systems. *Ecology and Society*, 14(1), 15.
13. Maimaitiyming, M., Ghulam, A., Tiyp, T., Pla, F., Latorre-Carmona, P., Halik, Ü., Sawut, M., & Caetano, M. (2014). Effects of green space spatial pattern on land surface temperature: Implications for sustainable urban planning and climate change adaptation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*: Official Publication of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), 89, 59-66. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.12.010>
14. Roussel, F. & Alexandre, F. (2021). Landscape ecological enhancement and environmental inequalities in peri-urban areas, using flora as a socio-ecological indicator-The case of the greater Paris area. *Landscape and Urban Planning*, 210, 104062. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104062>
15. Sharifi, A. (2019). Resilient urban forms: A macro-scale virtualysis. *Cities*, 85, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.11.023>
16. Genişyürek, F., Ertek, Ş., & Ertürk, M. (2022). Spatial and Temporal Assessment of Phaselis and its Surroundings with Multi-temporal Satellite Imagery. Zenodo (CERN European Organization for Nuclear Research). <https://doi.org/10.5281/zenodo.7351470>
17. Gunawardhana, L. N., Kazama, S. & Kawagoe, S. (2011). Impact of urbanization and climate change on aquifer thermal regimes. *Water Resources Management*, 25, 3247-3276. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9854-6>
18. Song, X., Feng, Q., Xia, F., Li, X., & Scheffran, J. (2021). Impacts of changing urban land-use structure on sustainable city growth in China: A population-density dynamics perspective. *Habitat International*, 107(102296), 102296. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2020.102296>
19. Breuste J., Niemelä J. & Snep R. P. H. (2008) Applying landscape ecological principles in urban environments. *Landscape Ecology*, 23: 1139-1142. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10980-008-9273-0>
20. Copernicus Land Monitoring Service. CORINE land cover. Retrieved June 12, 2024, from <https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover>
21. Krecl, P., Johansson, C., Norman, M., Silvergren, S., Burman, L., Mollinedo, E. M. & Targino, A. C. (2024). Long-term trends of black carbon and particle number concentrations and their vehicle emission factors in Stockholm. *Environmental Pollution*, 347, 123734. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123734>
22. Newman, P., Beatley, T., & Boyer, H. (2009). *Resilient cities: Responding to peak oil and climate change*. Island Press.
23. Oke, T. R. (1987). *Boundary Layer Climates*. Routledge.
24. Büttner, G. (2014). CORINE Land Cover and Land Cover Change Products. In: Manakos, I., Braun, M. (eds) *Land Use and Land Cover Mapping in Europe. Remote Sensing and Digital Image Processing*, vol 18. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7969-3_5
25. Cheng, H., Li, M., Zhao, C., Li, K., Peng, M., Qin, A. & Cheng, X. (2014). Overview of trace metals in the urban soil of 31 metropolises in China. *Journal of Geochemical Exploration*, 139, 31-52. <https://doi.org/10.1016/j.jgeplo.2013.08.012>
26. Grimm N. B., Faeth S. H., Golubiewski N. E., Redman C. L., Wu J., Bai X. & Briggs, J. M. (2008) Global change and the ecology of cities. *Science*, 319: 756-760. <https://doi.org/10.1126/science.1150195>
27. Decker, E. H., Elliott, S., Smith, F. A., Blake, D. R., & Rowland, F. S. (2000). Energy and material flow through the urban ecosystem. *Annual Review of Energy and the Environment*, 25(1), 685-740.
28. Eğilmez, G. & Park, Y. S. (2014). Transportation related carbon, energy and water footprint analysis of U.S. manufacturing: An eco-efficiency assessment. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 32, 143-159. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.07.001>
29. Niemelä J., Kotze J, Venn S, Penev L, Stoyanov I, Spence J., Hartley, D. & de Oca, E. M. (2002). Carabid beetle assemblages (Coleoptera, Carabidae) across urban-rural gradients: an international comparison. *Landscape Ecology*, 17: 387-401. <https://doi.org/10.1023/A:1021270121630>
30. Quan, J., Zhan, W., Ma, T., Du, Y., Guo, Z., & Qin, B. (2018). An integrated model for generating hourly Landsat-like land surface temperatures over heterogeneous landscapes. *Remote Sensing of Environment*, 206, 403-423. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.12.003>
31. Weng, H., Gao, Y., Su, X., Yang, X., Cheng, F., Ma, R., Liu, Y., Zhang, W. & Zheng, L. (2021). Spatial-temporal changes and driving force analysis of green space in coastal cities of southeast China over the past 20 years. *Land*, 10, 537. <https://doi.org/10.3390/land10050537>
32. Wu, J. (2008). Making the case for landscape ecology-an effective approach to urban sustainability. *Landscape Journal*, 27, 41-50. <https://doi.org/10.3368/lj.27.1.41>
33. Aksoy, T., Dabanli, A., Cetin, M., Senyel Kurkcuglu, M. A., Cengiz, A. E., Cabuk, S. N., Agacsapan, B., & Cabuk, A. (2022). Evaluation of comparing urban area land use change with Urban Atlas and CORINE data. *Environmental Science and Pollution Research International*, 29(19), 28995-29015. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17766-y>

34. Batrymenko, O., Chomko, D. & Tkach, O. (2024). Decarbonization as a multilateral political mechanism for carbon regulation. *Geology Geography Ecology*, 60, 323–334. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-23>
35. Cui, Q. & Li, Y. (2015). An empirical study on the influencing factors of transportation carbon efficiency: Evidences from fifteen countries. *Applied Energy*, 141, 209–217. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.040>
36. Iukhno, A., Opara, V. & Buzina, I. (2022). Improving of ecological and economic management of land resources by with zonal aspect. *Geology Geography Ecology*, 56, 277–295. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-56-21>
37. Lu, H., Xiao, C., Jiao, L., Du, X. & Huang, A. (2024). Spatial-temporal evolution analysis of the impact of smart transportation policies on urban carbon emissions. *Sustainable Cities and Society*. 101, 105177. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105177>
38. Zhang, Z. (2018). Artificial Neural Network. In: *Multivariate Time Series Analysis in Climate and Environmental Research*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67340-0_1
39. Wu, Y.-C., & Feng, J.-W. (2018). Development and application of artificial neural network. *Wireless Personal Communications*, 102(2), 1645–1656. <https://doi.org/10.1007/s11277-017-5224-x>
40. Shu, B., Chen, Y., Zhang, K., Dehghanifarsani, L. & Amani-Beni, M. (2024). Urban engineering insights: Spatiotemporal analysis of land surface temperature and land use in urban landscape. *Alexandria Engineering Journal*, 92, 273–282. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.02.066>
41. Nor, A. N. M., Corstanje, R., Harris, J. A. & Brewer, T. (2017). Impact of rapid urban expansion on green space structure. *Ecological Indicators*, 81, 274–284. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.05.031>
42. Yang, L., Xian, G., Klaver, J. M., & Deal, B. (2003). Urban land-cover change detection through sub-pixel imperviousness mapping using remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69(9), 1003–1010. <https://doi.org/10.14358/pers.69.9.1003>
43. Tabarelli, M., Aguiar, A. V., Ribeiro, M. C., Metzger, J. P., & Peres, C. A. (2010). Prospects for biodiversity conservation in the Atlantic Forest: Lessons from aging human-modified landscapes. *Biological Conservation*, 143(10), 2328–2340. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.02.005>
44. Smith, P., Davis, S. J., Creutzig, F., Fuss, S., Minx, J., Gabrielle, B., Kato, E., Jackson, R. B., Cowie, A., Kriegler, E., van Vuuren, D. P., Rogelj, J., Ciais, P., Milne, J., Canadell, J. G., McCollum, D., Peters, G., Andrew, R., Krey, V., ... & Sutherland, W. J. (2016). Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions. *Nature Climate Change*, 6(1), 42–50.
45. Sun, D. & Kafatos, M. (2007). Note on the NDVI-LST relationship and the use of temperature-related drought indices over North America. *Geophysical Research Letter*, 34, L24406. <https://doi.org/10.1029/2007GL031485>
46. Pickett, S. T., Cadenasso, M. L., Grove, J. M., Nilon, C. H., Pouyat, R. V., Zipperer, W. C., & Costanza, R. (2001). Urban ecological systems: Linking terrestrial ecological, physical, and socioeconomic components of metropolitan areas. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 32(1), 127–157.
47. Wolch, J. R., Byrne, J., & Newell, J. P. (2014). Urban green space, public health, and environmental justice: The challenge of making cities 'just green enough.' *Landscape and Urban Planning*, 125, 234–244. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.01.017>
48. Şahin, M. T., Hadimli, H., Çakır, Ç., Yasak, Ü., & Genişyürek, F. (2025). The Role of Urban Landscape on Land Surface Temperature: The Case of Muratpaşa, Antalya. *Land*, 14(4), 663. <https://doi.org/10.3390/land14040663>
49. Soldak M., Mezentsev K., Batunova E., Haase A., Haase, D. (2024). Emergent urban resilience in Ukraine: Adapting to polycrisis in times of war. *Ekonomichna ta Sotsialna Geografiya*, 92, 6–13, <https://doi.org/10.17721/2413-7154/2024.92.6-13>
50. Kostrikov, S. V., Niemets, L. M., Sehida, K. Y., Niemets, K. A., & Morar, C. (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), 107–124. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2018-49-09>
51. Morar C., Lukić T., Valjarević A., Niemets L., Kostrikov S., Sehida K., Telebienieva I., Kliuchko L., Kobylin P., Kravchenko K. (2022). Spatiotemporal Analysis of Urban Green Areas Using Change Detection: A Case Study of Kharkiv, Ukraine. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10, 823129 <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.823129>
52. Valjarević A., Morar C., Brasanac-Bosanac L., Cirkovic-Mitrovic T., Djekic T., Mihajlović M., Milevski I., Culafic G., Luković M., Niemets L., Sehida K., Kaplan G. (2025) Sustainable land use in Moldova: GIS & remote sensing of forests and crops. *Land Use Policy*, 152, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2025.107515>

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Екологічні наслідки урбаністичного розвитку та стале управління ландшафтами: кейс Муратпаші, Анталія

Фуркан Генішюрек¹

аспірант, кафедра географії,

¹ Університет Акденіз, Анталія, Туреччина;

Людмила Немець²

д. геогр. н., професор, завідувач кафедри соціально-економічної географії

і регіонознавства імені Костянтина Нємця,

² Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, Україна;

Мехмет Тахсин Шахін¹

д. філософії (географія), доцент, кафедра географії;

Катерина Сегіда²

д. геогр. н., професор, кафедра соціально-економічної географії

і регіонознавства імені Костянтина Нємця

Інтенсивна урбанізація є явищем, що суттєво впливає на зміну довкілля та викликає серйозні занепокоєння щодо сталості розвитку міст. Тиск людської діяльності на екологічні території спричиняє скорочення та зменшення зв'язності регіональних екологічних мереж, підвищує рівень забруднення, погіршує екологічні функції та створює загрозу сталому розвитку міських територій. Це дослідження комплексно розглядає екологічні наслідки урбанізації та її вплив на міські ландшафти в районі Муратпаша міста Анталія, що включає аналіз екологічних наслідків урбаністичного розвитку в Муратпаші, виявлення впливу цього процесу на міський ландшафт через аналіз дотичних змінних, виявлення змін у землекористуванні та прогнозування їхньої майбутньої динаміки. Дослідження має на меті подолання просторових нерівностей у розподілі зелених зон, оцінку викидів вуглецю та динаміки трансформацій міського ландшафту, а також формування рекомендацій щодо сталого міського планування. У роботі використано дані CORINE про землекористування, супутникові знімки Landsat, Протокол GHG, штучні нейронні мережі та геоінформаційні системи (ArcGIS). Проведено оцінку зелених зон, класифікацію землекористування, розрахунок викидів вуглецю, а також прогнозування змін у землекористуванні до 2040 року. Крім того, було здійснено аналіз розподілу зелених зон на рівні мікрорайонів залежно від щільності населення. Дослідження виявило різке зростання кількості автотранспорту та викидів вуглецю в Муратпаші в період з 1994 по 2023 рік. У той самий час площі зелених зон скоротилися, а темпи урбанізації зросли. У прибережних районах спостерігалось більше зелених насаджень, тоді як у внутрішніх – значно менше. Прогнози на 2040 рік свідчать про подальше зменшення зелених зон і збільшення щільності забудови. Дані CORINE демонструють, що сільськогосподарські угіддя та природні середовища зазнають суттєвого тиску внаслідок міського розвитку. Район Муратпаша перебуває на критичному етапі в контексті екологічної сталості. Зменшення змін у землекористуванні, викидів вуглецю та просторової нерівності у розподілі зелених зон вимагає впровадження стратегій сталого міського планування. Збереження зелених насаджень, підтримка біорізноманіття та мінімізація вуглецевого сліду є ключовими умовами реалізації ефективної політики сталого розвитку.

Ключові слова: сталість (стійкість), урбаністичний розвиток, міські зелені зони, прогнозування землекористування, викиди вуглецю, ArcGIS, штучна нейронна мережа, Муратпаша, Анталія.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 21 березня 2025 р.

Прийнята 29 квітня 2025 р.

Дорожня ландшафтно-інженерна система Київ-Одеса: функціонування, сучасний геохімічний стан, проблеми раціонального використання

Григорій Денисик¹

д. геогр. н., професор, кафедра географії,

¹ Вінницький державний педагогічний університет імені Михайла Коцюбинського, Вінниця, Україна,

e-mail: grygden@ukr.net,  <http://orcid.org/0000-0002-0941-9217>;

Людмила Атаман¹

к. геогр. н., доцент, кафедра географії,

e-mail: ataman2412@gmail.com,  <http://orcid.org/0000-0003-4600-7526>;

Богдан Денисик¹

к. геогр. н., старший викладач, кафедра географії,

e-mail: hugebo92@gmail.com,  <http://orcid.org/0000-0002-3996-1875>

У статті розглянуто окремі проблеми функціонування дорожніх ландшафтів України. Мета – на прикладі найпотужнішої в Україні дорожньої ландшафтно-інженерної системи Київ-Одеса дослідити особливості формування, функціонування та сучасний геохімічний стан дорожніх і прилеглих до них ландшафтів для їх подальшого раціонального використання. У процесі дослідження застосовано ландшафтно-динамічний, геохімічний та екологічний підходи та належні їм методи: польових ландшафтознавчих вишукувань, аналізу і синтезу, історико-географічний, картографічний та моделювання. Як наскрізні використано методи ГІС-технологій. Зазначено, що дорожнім ландшафтам, особливо їх більш розповсюдженим і динамічним ландшафтно-інженерним системам, географи і ландшафтознавці України приділяють мало уваги. Показано, що у структурі сучасних дорожніх ландшафтів України доцільно виділяти три їх складові (підсистеми): дорожні ландшафтно-інженерні та дорожні ландшафтно-техногенні системи, які часто об'єднують під загальною назвою дорожні ландшафтно-технічні системи та нефункціонуючі дорожні ландшафти – виведені з експлуатації дорожні ландшафти, що розвиваються за природними закономірностями. Упродовж 2018-2021 років проведено геохімічні дослідження на вміст важких металів (цинку, свинцю, кадмію і міді) у ґрунтовому та сніговому покривах, їх міграції та акумуляцію у придорожніх смугах активно діючої дорожньої ландшафтно-інженерної системи Київ-Одеса. Встановлено, що тут у ґрунтовому та сніговому покривах важкі метали активно накопичуються, перерозподіляються та частково самоочищаються. На деяких натурних ділянках ДЛІС Київ-Одеса виділено аномальні частини, на яких вміст цинку та свинцю перевищував норму ГДК в 2-3 рази. Виділено 4 зони забруднення важкими металами: інтенсивного забруднення (0-5 м від полотна дороги); середнього забруднення (5-10 м); слабого забруднення (10-15 м) та відносно чиста (понад 20 м від полотна автомагістралі). Загалом, попри свою потужність, дорожня ландшафтно-інженерна система Київ-Одеса не належить до критично забруднених важкими металами, що свідчить про її здатність до самоочищення. Зазначено, що у перспективі більше уваги необхідно приділяти не лише геохімічним і екологічним проблемам функціонування дорожніх ландшафтів, але і їх геофізичним, рекреаційним, естетичним станам.

Ключові слова: автомагістраль, дорожній ландшафт, дорожня ландшафтно-інженерна система, геохімічні дослідження, придорожні екозони, раціональне використання.

Як цитувати: Денисик Григорій, Атаман Людмила, Денисик Богдан (2025). Дорожня ландшафтно-інженерна система Київ-Одеса: функціонування, сучасний геохімічний стан, проблеми раціонального використання. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (62), 174-183. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-13>

In cites: Denysyk Hrygoriy, Ataman Liudmyla, Denysyk Bogdan (2025). Road landscape and engineering system Kyiv-Odesa: functioning, current geochemical state, problems of rational use. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (62), 174-183. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-13> [in Ukrainian]

Вступ. Разом із селитебними дорожні ландшафти формують своєрідний каркас сучасного антропогенного ландшафту України. Визначальними у функціонуванні дорожніх ландшафтів є дорожні ландшафтно-інженерні системи (ДЛІС) – сучасні, активно діючі дороги з належною їм інфраструктурою [5]. Попри значущість ДЛІС у господарській діяльності людей, екологічному впливові на довкілля та здоров'я людей, їх дослідження набувають актуальності й у зв'язку з сучасними воєнними та соціально-економічними процесами в Україні, а також об'єднанням дорожніх ландшафтів, переважно ДЛІС, України й

Західної Європи. Однак, на початку ХХІ ст. дорожні ландшафти України, просторово-часові особливості їх формування, ландшафтна структура, функціонування, вплив на навколишнє середовище, досліджені лише частково у межах Поділля, Волині, Придніпров'я. Дорожні ландшафтно-інженерні системи розглянуті у загальному контексті, дещо більше уваги приділено їх геохімічним властивостям. Комплексних досліджень ДЛІС з позиції природничої і конструктивної географії та антропогенного ландшафтознавства мало.

Дорожня ландшафтно-інженерна система

Київ-Одеса, одна з найпотужніших у межах України, є оптимальною моделлю для детальних досліджень подібного статусу. Вона складна, неоднорідна й динамічна. З Києва до Одеси, через природні зони лісостепу й степу, ДЛПС простягається на 537.2 км, перетинає п'ять адміністративних областей і з'єднує центральну частину України з північним узбережжям Чорного моря. Дослідження своєрідної історії формування ДЛПС Київ-Одеса, її сучасної структури і властивостей, прояву несприятливих процесів та розробка заходів їх оптимізації має суттєве наукове і практичне значення, а також буде стимулом для проведення подібних досліджень інших ДЛПС України.

Огляд попередніх досліджень і публікацій.

Дорожні ландшафти України загалом, а в їх структурі дорожні ландшафтно-інженерні системи, зацікавили ландшафтознавців наприкінці другої половини ХХ ст. [4]. Упродовж минулих 20 років ХХІ ст. дорожнім ландшафтам України приділено значно більше уваги, однак вони стосуються лише окремих проблем їх функціонування та стану. Чикайло Ю. І. здійснила еколого-географічний аналіз автомагістралі Львів-Краковець [19]. Аналіз точності відображення автомобільних доріг в Україні і США здійснили харківські й київські вчені [16]. Значна кількість публікацій стосується окремих складових дорожніх ландшафтів, особливо придорожніх. У межах Чернівецької області дослідженням з еколого-геохімічного оцінювання дорожніх геосистем проводили М. В. Танасюк та Г. Д. Ходан [18]. В окремих дослідженнях увага приділяється визначенню концентрації важких металів (Pb, Cd, Cu, Zn) у ґрунтового та сніговому покриві вздовж транспортних магістралей індустріально-урбанізованих територій. Р. Б. Ванчура навів порівняльну характеристику вмісту важких металів у приміагістральних ділянках території України та Німеччини [1]. На території Чернігівської області, вміст важких металів у ґрунті та овочевої продукції в зоні автотраси Чернігів-Гомель дослідили А. І. Мельник та Г. О. Усманова [17]. О. Купчик та Ж. Дерій у межах цієї області здійснили аналіз вмісту важких металів у сніговому покриву дорожніх ландшафтів [11]. В. А. Юрченко, О. Г. Мельникова та М. В. Янчик дослідили хімічний склад поверхневих стічних вод із автомобільних доріг та дорожньо-інфраструктурних комплексів на території Харківської області [20]. Комплексні геохімічні дослідження дорожніх ландшафтів переважно Київського регіону проведені О. О. Галаганом [2]. Денисик Г. І., Вальчук О. М. з ландшафтознавчого погляду, виділили й обґрунтували наявність у ДЛПС екотон, розглянули їх структуру та значимість [5, 6]. Програму моніторингового дослідження лінійних аспектів інфраструктури на

прикладі автомагістралі Київ-Одеса розробив С. П. Огілько [14]. Цим же автором проведено зонування автомобільних доріг Черкаської області за ступенем сформованості екосистемних відносин [13] та охарактеризовано формування придорожніх систем [15]. І. Кравцова, С. Сонько, О. Василенко, І. Гурський, С. Огілько розглянули формування біоценозів у придорожніх ландшафтах Черкаської області [10]. Більшість із цих досліджень стосувались й дорожніх ландшафтно-інженерних систем та враховано авторами у цьому дослідженні.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Чіткий поділ дорожніх ландшафтів на три складових: дорожні ландшафтно-інженерні та дорожні ландшафтно-техногенні трьохблокові (природа, техніка, управління) системи та нефункціонуючі дорожні ландшафти, як геокомпонентні системи. Детальне пізнання сучасних активуючих дорожніх ландшафтно-інженерних систем, їх геохімічного стану та проблем подальших досліджень на прикладі найпотужнішої в Україні ДЛПС Київ-Одеса. Результати можна використати в процесі подібних досліджень інших, різнорангових дорожніх ландшафтів України.

Методи дослідження. Серед головних природничо-географічних і ландшафтознавчих підходів дослідження ДЛПС були ландшафтно-геодинамічний, геохімічний, екологічний та інформаційний, а також принципи – історичний, природньо-антропогенного сумісництва, системності. Окрім польових ландшафтознавчих методів, використано загальнонаукові (аналізу, синтезу, порівняння, дедукції, індукції) та конкретно наукові (картографічний, історично-географічний, моделювання, балансовий, геохімічний, періодизації) прийоми й методи. Для збереження та відтворення візуальних даних використано методи ГІС-технологій та комп'ютерного моделювання, із застосуванням програм: графічного редактора CorelDRAW; фоторедактора Adobe Photoshop. Використано відкриті мережі космічних знімків Землі Google Earth.

Результати дослідження. Дорога і дорожні ландшафти – два різних, однак генетично взаємопов'язаних між собою понять. Дорога лише основа, головна вісь дорожнього ландшафту. Дорожній ландшафт – це складна система антропогенного, переважно технічного походження, структуру й особливості функціонування якої визначають власне дорога і належна їй інфраструктура [8]. Виокремлено й обґрунтовано три категорії дорожніх ландшафтів:

- дорожні ландшафтно-інженерні системи (ДЛПС) – сучасні трьохблокові (природа, техніка, управління), активно функціонуючі дорожні

ландшафти;

- дорожні ландшафтно-техногенні системи (ДЛТС) – це ДЛПС, що вийшли із активного використання у яких відсутній блок управління і лише частково функціонує технічний блок;

- нефункціонуючі дорожні ландшафти (НДЛ) – виведені з експлуатації дорожні ландшафти, що розвиваються за природними закономірностями.

У сучасній структурі дорожніх ландшафтів України переважають дорожні ландшафтно-інженерні системи. Найпотужнішою з них є автомагістраль Київ-Одеса. Її активна розбудова відбулася упродовж ХХ ст. У 1926 році відкрили автомобільну дорогу Київ-Одеса, а з 60-х років ХХ століття її почали розбудовувати як ландшафтно-інженерну систему. На початку ХХІ ст. загальна протяжність автомагістралі Київ-Одеса – 504.6 км, обхід м. Одеса – 32.6 км, разом – 537.2 км. Ширина земляного полотна дороги на всій протяжності 12 м, ширина проїзної частини – 7.0-7.5 м. Переважає двошарове асфальтове покриття товщиною 40 см на різних основах (213.3 км) та цементобетонне товщиною 20-22 см на піщаній основі або ґрунті, що стабілізований бітумом (174.5 км), решта покриття змішане. До 2000 року на автомагістралі Київ-Одеса збудовано 29 мостів загальною довжиною 1410.5 км, серед яких – через річки Рось (202.3 м), Південний Буг (160.1 м) та протоку Хаджибейського лиману (206.5 м).

З метою розвитку міжнародного транспортного коридору №9 Верховною Радою України у 2003 році було прийнято ухвалу «Про реконструкцію та експлуатацію на платній основі автомобільної дороги Київ-Одеса на ділянці від Жашкова до Червонознам'янки». Це будівництво відоме українцям під назвою «Будівництво автобану Київ-Одеса». Хоча автодорога не відповідає всім критеріям і не є автобаном, її відносять до автомобільних доріг загального користування державного значення. Протяжність ділянки, яка підлягала реконструкції, становила 219 км, загальна вартість робіт – 3,9 млрд. грн. Реконструкція почалася на 118 ділянках автодороги в Черкаській, Кіровоградській, Миколаївській і Одеській областях. До робіт було залучено 63 дорожньо-будівельні і спеціалізовані мостобудівні організації, з українських дорожньо-будівельних та мостобудівних підприємств, будівельні підрозділи Укрзалізниці, залізничні війська, будівельні фірми з росії, Туреччини, білорусії, Фінляндії, Німеччини та Македонії, а також автотранспортні механізми підрозділів ВАТ ДАК «Автомобільні дороги України» з усієї України, понад 1780 одиниць техніки. Розрахункові навантаження – 11,5 тон на вісь. Розрахункова швидкість автомобільного транспорту – 140 км/год. Інтенсивність руху на ДЛПС Київ-Одеса становить від 10 000 до 48 500 автомобілів

на добу у Київській області, у Черкаській області – від 10 000 до 16 000 автомобілів на добу, в Одеській області – від 10 000 до 40 000 автомобілів на добу [8].

У структурі дорожніх ландшафтно-інженерних систем постійно зростає кількість та якісне оформлення інфраструктурних елементів (дорожні знаки, рекламні щити, освітлення тощо) і комплексів. Дорожні ландшафтно-інфраструктурні комплекси (ДЛПК) – структури ДЛПС, функціонування яких забезпечує комфортні умови для діяльності людини і транспорту (автозаправні станції, кафе, мінімаркети, готелі, кемпінги, хостели, місця відпочинку, СТО, пости патрульної служби національної поліції України, вагові комплекси, придорожні базари тощо). Інфраструктурні дорожні елементи і комплекси поступово стають однією з визначальних ознак ДЛПС, зокрема і її комфортності. У структурі сучасних дорожніх ландшафтно-інженерних систем України вони займають від 7% до 12-14% їх територій і площі постійно зростають. У структурі ДЛПС «Київ-Одеса» дорожні інфраструктурні комплекси займають 10-12% її території і формуються, переважно, на основі численних тут АЗС (рис. 1). Їх кількість нестабільна і дещо зменшується за минулі 3-4 роки.

Типова структура ландшафтно-інфраструктурного комплексу показана на прикладі окремої автозаправної станції в околицях м. Біла Церква Київської області (рис.2). Скупчення інфраструктурних елементів і комплексів у межах ДЛПС, формують дорожні ландшафтно-інфраструктурні вузли (ДЛІВ), пізнання яких потребує детальніших досліджень у майбутньому.

Технічне (переважно автомобільне) й соціальне (інфраструктурне) навантаження на ДЛПС Київ-Одеса зростає прискореними темпами, що призводить до нестабільних її геохімічного й екологічного станів, а також частини прилеглих до ДЛПС ландшафтів. Забруднення дорожніх ландшафтно-інженерних систем спричинене функціонуванням автомобільного транспорту (деталлями конструкції автомобіля), а на окремих ділянках впливом сільськогосподарських ландшафтів, де активно використовують фосфатні добрива. Важкі метали потрапляють у ґрунти та накопичуються у межах ДЛПС на глибині від 0 до 20 см, а при значній концентрації проникають на глибину до 100-150 см у залежності від підстильного субстрату.

Для дослідження важких металів у ДЛПС Київ-Одеса у 2019 році закладено 28 натурних ділянок (одна ділянка на 20-25 км автомагістралі). Найбільш детально опрацьовані з них і суттєві для пізнання геохімічного стану ДЛПС Київ-Одеса розглянуті у подальшому.

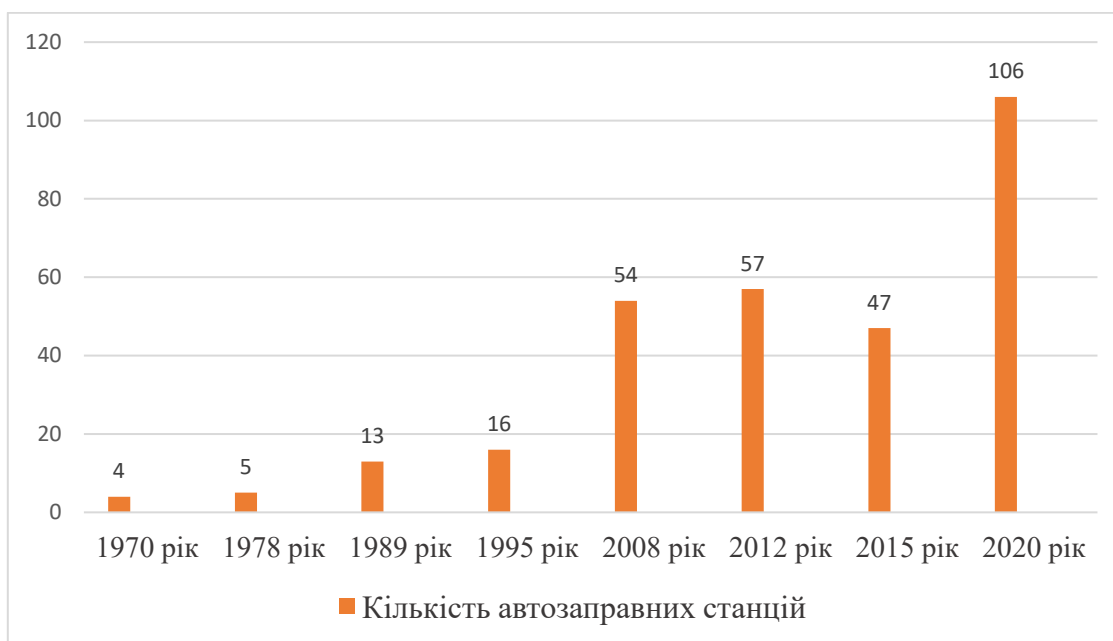


Рис. 1. Динаміка розбудови АЗС на автотрасі Київ-Одеса (1970-2020 роки) /

Fig. 1. Dynamics of gas station development on the Kyiv-Odesa highway (1970-2020)

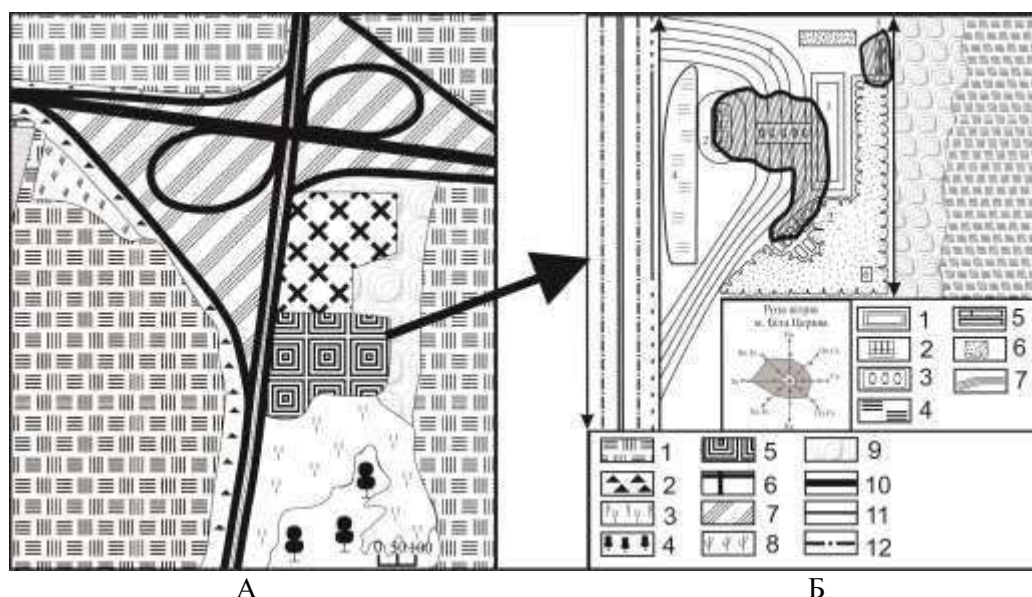


Рис. 2. Ландшафтна структура АЗС в околицях м. Біла Церква /

Fig. 2. Landscape structure of the gas station in the vicinity of the city of Bila Tserkva

А. Дорожня ландшафтно-інженерна система «Київ-Одеса». Урочища: 1) вирівняна лесова поверхня, вкрита чорноземами типовими, під польовими сівозміними; 2) лесовий схил, крутизною 4-6° із чорноземами типовими, різноманітною трав'янистою рослинністю (осика волосиста, медунка темна, копитняк); 3) слабо-хвиляста лесова поверхня, вкрита чорноземами типовими, зайнята лучно-трав'янистою рослинністю та бур'янами; 4) лесові підвищення, крутизною 7-9°, із чорноземами типовими та деревними асоціаціями (граб, дуб, акація, береза); 5) вирівняна лесова поверхня, зайнята АЗС; 6) вирівняна лесова поверхня, зайнята ринком сільськогосподарської техніки; 7) лесовий схил, крутизною 40-45°, із чорноземами типовими під трав'янистою та рудеральною рослинністю; 8) вирівняна лесова поверхня, із чорноземами типовими зайнята сільськогосподарськими культурами; 9) слабо-хвиляста лесова поверхня, із чорноземами типовими під польовими сівозміними; 10) автомобільна дорога, вкрита асфальтним покриттям, шириною 14 м; 11) автомобільна дорога, вкрита асфальтним покриттям, шириною 7 м; 12) роздільна смуга, шириною 3,5 м, вкрита насипним ґрунтом, із трав'янистою рослинністю.

Б. Складне урочище АЗС. Урочища: 1) вирівняна лесова поверхня, зайнята під будівлю станції; 2) підземні резервуари для пального (довжина – 2,72 м; ширина – 1,90 м; об'єм – 6000 л); 3) вирівняна лесова поверхня, вкрита асфальтним покриттям, на якій розташовані заправні острівці; 4) вирівняна лесова поверхня, із чорноземами типовими з декоративними рослинами; 5) слабо-хвиляста лесова поверхня, вкрита залізобетоном, з естакадою для зливання мастил; 6) вирівняна лесова поверхня, вкрита асфальтним покриттям, на якій розташовані очисні споруди; 7) майданчик для автомобілів.

Серед важких металів основними забруднювачами ДЛПС Київ-Одеса (грунту, водойм, повітря, рослин) є цинк, свинець, кадмій та мідь. Їх аналіз здійснено першочергово.

Вміст *цинку* у ґрунті залежить від багатьох чинників серед яких: викиди автомобілів, властивості материнської породи, вміст різних органіч-

них речовин в ґрунті та реакції ґрунтового розчину. Загалом ґрунти України бідні на цинк, однак у гумусовому шарі його вміст часто підвищується. Цинк тісно пов'язаний із кадмієм, чим більша концентрація цинку тим більше кадмію є у ґрунті. Гранично допустимий концентрат (ГДК) цинку у ґрунті близько 23 мг/кг.



Рис. 3. Вміст цинку у ДЛПС Київ-Одеса /

Fig. 3. Zinc content in the Kyiv-Odesa road landscape engineering structure (RLES)

На фонових ділянках вміст Zn знаходиться у межах норми. Однак на ділянці поблизу м. Умань, на розвилці «Лист конюшини», знаходиться аномальна для придорожніх ландшафтів ділянка на відстані 10 м від полотна дороги. Тут зафіксовано надмірну кількість вмісту рухомої форми Zn у ґрунті – 40,90 мг/кг (рис. 3), що не характерне для цієї місцевості, та перевищує ГДК майже вдвічі (ГОСТ 17.4.3.06-86) [9].

За попередніми дослідженнями у 2016-2017 роках вміст цинку на цій ділянці становив – 44,50 мг/кг, тобто ще з більшим перевищенням ГДК. Ділянка дослідження має невелику площу (1,2 га). Це дало можливість виділити її як аномальну за впливом важких металів. Моніторинг на вміст цинку поблизу м. Умань на розвилці «Лист конюшини» показав, що із часом кількість важкого металу у ґрунті поступово зменшується. Це пов'язано із самоочищенням ґрунту, яке відбувається повільно і у майбутньому цей показник може сягнути норми. Зараз вміст Zn у ґрунті знаходиться у надмірній кількості, що є небезпечним для нормального функціонування ґрунтової біоти та рослинного покриву, а також для здоров'я людей.

Рухома форма *свинцю* у ґрунті за ДСТУ4770-9-2007 становить 6,0 мг/кг. Основна маса свинцю, що надходила у ґрунт переважно в минулому і частково тепер, спричинена результатом дії згоран-

ня пального автомобільними двигунами. На фоновій ділянці поблизу м. Київ свинець слабо проявляється (рис. 4).

Значне підвищення рівня ГДК Pb зафіксовано у межах натурної ділянки Біла Церква. Крім автомобільного транспорту, на вміст свинцю в ДЛПС Київ-Одеса проявляється вплив промислових підприємств міста. Його показник збільшується від джерел забруднення і набуває максимального значення у 10 метровій смузі – 9,1 мг/кг, у 15 – 6,9 мг/кг, що явно перевищує встановлену норму ГДК. На натурній ділянці поблизу с. Нестерівка свинець майже не проявляється. На локальній ділянці в околицях с. Піківець зберігається тенденція до зменшення кількості вмісту важкого металу від джерела забруднення. На відстані 5 метрів від полотна дороги показник свинцю становив – 9,3 мг/кг, що перевищує гранично допустимий концентрат. Однак на 10 та 15-ти метрових відстанях вміст Pb зменшився майже вдвічі. На локальній фоновій ділянці м. Умань – розвилці «Лист конюшини», вміст свинцю проявляється по-іншому. На ділянці 5 метрів від полотна дороги вміст Pb найменший і становить – 4,3 мг/кг, однак на 10 та 15-ти метровій відстанях зафіксовано збільшення ГДК від 6,0 до 6,5 мг/кг. Поблизу ділянки Криве Озеро свинець в межах 2-2,2 мг/кг, що становить менше норми. Однак кіль-

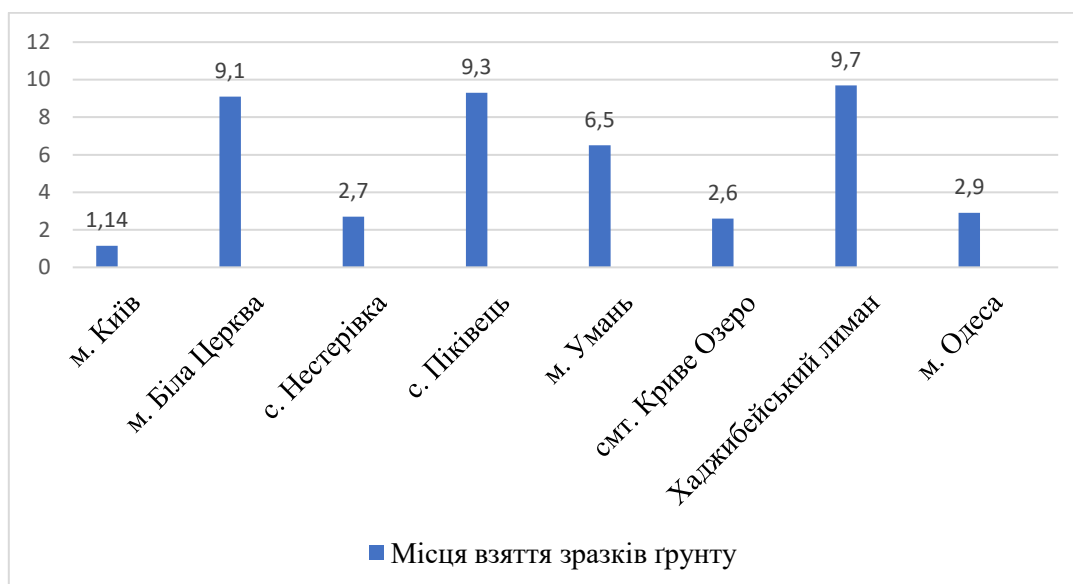


Рис. 4. Вміст свинцю у ДЛІС Київ-Одеса /

Fig. 4. Lead content in the Kyiv-Odesa road landscape engineering structure (RLES)

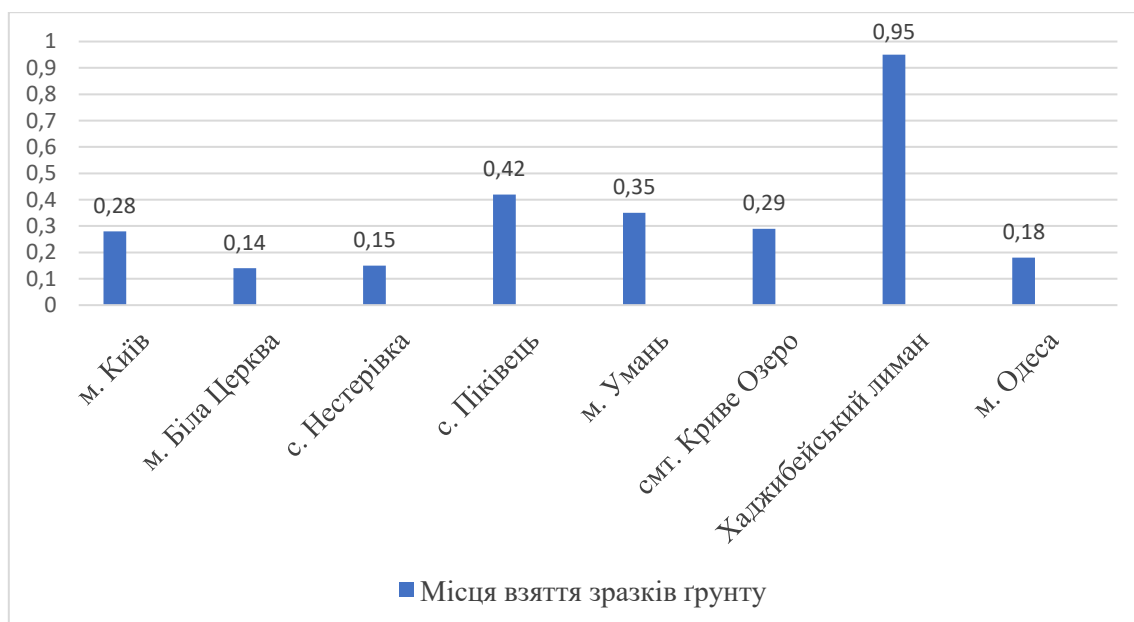


Рис. 5. Вміст кадмію у ДЛІС Київ-Одеса /

Fig. 5. Cadmium content in the Kyiv-Odesa road landscape engineering structure (RLES)

кiсть свинцю на досліджуваній ділянці поблизу Хаджебейського лиману значно вища за ГДК. Невелика площа ділянки дає змогу виокремити аномальну ділянку із перевищеним вмістом свинцю у 1,5 рази. На відстані 5 метрів від автодороги вміст свинцю становить – 9,7 мг/кг, що перевищує ГДК. На відстані 10 та 15 м показник спадає, що вказує на залежність зменшення вмісту важкого металу у ґрунті від джерела забруднення. На локальній ділянці поблизу м. Одеса свинець становить нижче норми ГДК [8].

Вміст кадмію у ґрунті за ГДК становить 0,7 мг/кг і на всіх натурних ділянках дорожньої ландшафтно-інженерної системи Київ-Одеса знаходиться в межах норми 0,11 – 0,42 мг/кг (рис. 5).

Кадмій взаємопов'язаний із цинком, та має схожі хімічні властивості. На досліджуваних ділянках спостерігається тенденція щодо зменшення вмісту кадмію у ґрунті від джерела забруднення. Однак порівнявши результати дослідження за 2016-2019 роки на цій ділянці вміст кадмію збільшився у кілька разів, але не перевищив ГДК. Це пояснюється тим, що Cd зосереджений у ґрунті як розсіяний елемент, який легко акумулюється та перерозподіляється у ґрунтах.

Гранично допустима концентрація рухомої форми міді у ґрунті становить 3,0 мг/кг (рис. 6).

За результатами досліджень кількість міді в ґрунтах усіх натурних ділянок коливається від 0,13 – 0,63 мг/кг, що є нормою. У більшості випа-

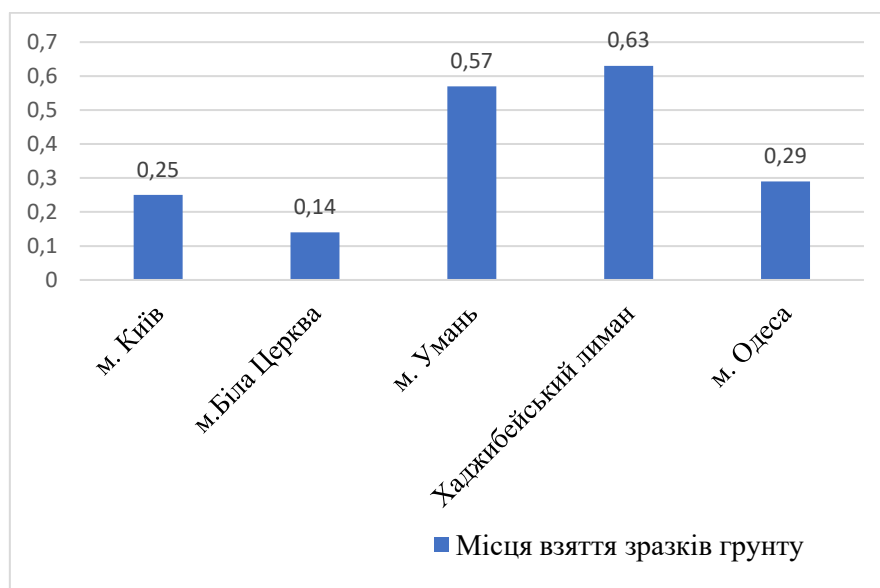


Рис. 6. Вміст міді у ДЛІС Київ-Одеса /

Fig. 6. Copper content in the Kyiv-Odesa road landscape engineering structure (RLES)

дків мідь накопичується у суглинкових та піщаних ґрунтах, які є фоновими в дорожній ландшафтно-інженерній системі Київ-Одеса. Спостерігається зменшення кількості вмісту міді від джерела забруднення. Зокрема зменшення вмісту важкого металу від автомобільної дороги, має натурна ділянка поблизу с. Піківець Черкаської області. На відстані 5 метрів від полотна автодороги кількість міді в ґрунті 0,55 мг/кг, однак уже на відстані 10 метрів показник сягає 0,33 мг/кг, а на 15 метровій, вміст міді у ґрунті становить 0,18 мг/кг, що не впливає на функціонування рослин та біоти. Дослідження вмісту міді у ґрунті на дорожній ландшафтно-інженерній системі Київ-Одеса за 2016-2019 роки показали, що кількість цього хімічного елементу зменшується на всіх натурних ділянках. Це пояснюється тим, що основна кількість міді зосереджується у 5 метровій смузі, а далі прослідковується зменшення показника забруднення від його джерела.

На важкі метали досліджено сніговий покрив у придорожній смузі ДЛІС Київ-Одеса. У законодавстві України відсутні державні стандарти вмісту хімічних речовин, а також важких металів у сніговому покриві, який піддається впливу зовнішніх чинників. При аналізі талого снігу можливе використання методик, які прирівнюються для якості води.

Сніговий покрив дорожньої ландшафтно-інженерної системи Київ-Одеса в окремі роки може формуватися від 20-30 до 130-160 днів. Його середня тривалість становить 60-70 днів із висотою 12-15 см [12].

Для дослідження хімічних елементів у сніговому покриві обрано 7 натурних ділянок, які безпосередньо прилягають до автотраси Київ-Одеса.

Перша локальна ділянка знаходиться біля в'їзду в м Київ (Київська обл.); друга поблизу м. Біла Церква (Київська обл.); третя в околицях с. Нестерівка (Черкаська обл.); четверта поблизу с. Піківець (Черкаська обл.); п'ята неподалік м. Умань на розвилці «Лист конюшини» (Черкаська обл.), де перетинається дорога міжнародного значення Стрий – Тернопіль – Кропивницький – Знам'янка із автотрасою М – 05; шоста ділянка розташована поблизу смт Криве Озеро на розвилці «Лист конюшини», де перетинаються автотраса М – 05 із автодорогою регіонального значення Р – 75 (Слобідка – Балта – Криве Озеро – Первомайськ – Доманіка – Олександрівка); сьома ділянка знаходиться при в'їзді в м. Одесу [7].

Зразки снігу відбирали на глибині 0-10 см із п'ятикратною повторюваністю, у скляну тару із підписаними етикетками, на відстані 5-10 м від полотна автодороги. Аналізи виконано в Уманському міськрайонному відділі ДУ «Черкаський ОЛЦ МОЗ України» та Черкаській філії державної установи «Інститут охорони ґрунтів України». Загальне розташування досліджуваних ділянок на відстані 50-70 км одна від одної дало змогу зафіксувати зміни накопичення важких металів у сніговому покриві та дозволило провести моніторинг якості снігу на різних ділянках автодороги Київ-Одеса. Зимі під час дослідження були сніжними та морозними, що дало можливість провести збір проб снігу у другій половині лютого – на початку березня. За результатами показників досліджень хімічного складу води у зразках було виявлено такі елементи: важкі метали (Cu, Mg та Fe), кальцій (Ca), магній (Mg), хлориди (Cl-), сульфати (SO₄₋₂), аміак (NH₃), нітрати (NO₃), фториди, нітрити (NO₂₋) та марганець (Mn).

Хімічний склад снігового покриву автодороги М – 05* /
Chemical composition of snow cover on highway M – 05*

Назва ділянки	pH	Завислі речовини, мг/дм ³	Головні іони, мг-екв/дм ³					
			SO ₄ -2	Cu	Ca	Mg	Cl-	NO ₃ -
м. Умань, лист конюшини, Черкаська область)	8,45	0,61	4,8	0,002	8,0	1,2	7,0	2,25
с. Піківець, (Черкаська обл.)	7,34	0,50	6,5	0,002	2,0	1,2	12,0	2,39
смт Криве Озеро, (Миколаївська обл.)	7,76	0,55	0,9	0,002	4,0	1,2	15,0	2,25

Як видно з таблиці 1 найбільш забруднена ділянка ДЛПС «Київ-Одеса» знаходиться у м. Умань, на розв'язці «Лист конюшини», де перетинається дорога міжнародного значення Стрий – Тернопіль – Кропивницький – Знам'янка із автотрасою М – 05, і навантаження транспортними засобами є подвійне.

Висновки. Разом з селитебними, дорожні ландшафти формують антропогенний каркас сучасного ландшафту України. Це складні й динамічні ландшафтні системи у структурі яких прослідковуються три складові (підсистеми): дорожні ландшафтно-інженерні та дорожні ландшафтно-техногенні системи і нефункціонуючі дорожні ландшафти. Основну суть й визначальні ознаки дорожніх ландшафтів будь-якої території, зокрема й України, формують ДЛПС. Одна з найпотужніших в Україні дорожня ландшафтна система – автомагістраль Київ-Одеса протяжністю 537.2 км, загальною площею близько 14.5 км².

Крім «лінійної» географії, значних площ, господарської значимості, дорожні ландшафти, особливо ДЛПС, виокремлюються й своїми геохімічними та екологічними характеристиками. Аналіз вітчизняних та зарубіжних досліджень геохімічних властивостей дорожніх ландшафтів і наші вишукування у межах територій ДЛПС Київ-Одеса, дають можливість зробити висновок, що здебільшого немає потреби, та й можливостей, здійснювати суцільні геохімічні заміри, а достатньо лише провести детальні дослідження на натуральних, типових для ДЛПС, ділянках. Незважа-

ючи на те, що дорожня ландшафтно-інженерна система Київ-Одеса є найпотужнішою в Україні, її забрудненість важкими металами поки що невисока – лише на аномальних, невеликих за площею ділянках, вміст цинку та свинцю в ґрунтах перевищує ГДК у 2-3 рази. Значно інтенсивніше забруднений сніговий покрив, зокрема і важкими металами. Це свідчить про те, що можливо ДЛПС Київ-Одеса ще не втратила властивість до самоочищення.

У подальших дослідженнях дорожніх ландшафтів України, зокрема й таких потужних ДЛПС як Київ-Одеса, більше уваги необхідно приділяти не лише геохімічним та екологічним, але й геофізичним властивостям. Їх пізнання є не менш важливим. Серед геофізичних властивостей ДЛПС помітно виділяються акустичні, і в першу чергу звуко-шумове забруднення, яке призводить до формування так званих дорожніх звукових полів. Крім цього не менше значення мають такі геофізичні властивості ДЛПС як освітлення, температурний режим, вібрація тощо. Суттєвою проблемою залишається й картографування дорожніх ландшафтів, особливо активnodіючих і динамічних дорожніх ландшафтно-інженерних систем.

Знання та розуміння геохімічних, геофізичних, екологічних несприятливих процесів та їх оптимізація у ДЛПС, дасть можливість поступово перетворити автомагістраль Київ-Одеса у транспортну систему комплексного використання – транспортного, наукового, рекреаційного, естетичного.

Список використаних джерел

1. Ванчура, Р. Н. (2011). Експериментальні дослідження вмісту важких металів в охоронних зонах автомагістралей. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. Вип. 75, 110-114.
2. Галаган, О. О. (2014). Використання ГІС при моделюванні первинного поля забруднення важкими металами при автомагістральних територіях. *Вісник Львівського університету. Серія географічна*. (48), 75-79.
3. Галаган, О. О. (2013). Моделювання розподілу важких металів у приавтомагістральних геосистемах. *Фізична географія та геоморфологія*. №2, 28-33.
4. Денисик, Г. І. (1998). *Антропогенні ландшафти Правобережної України: монографія*. Вінниця: Арбат. 292 с.
5. Денисик, Г. І., & Вальчук О. М. (2005). *Дорожні ландшафти Поділля*. Вінниця: ПП «Видавництво «Теза». 178.
6. Denysyk, H., Valchuk-Orkusha, O., Kanska, V., Kanskyi, V., & Kozynska, I. (2022). Ecozones of road landscape-engineer systems: structure, typology, significance. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. T. 31. Bunysk 4, 591-600. <https://doi.org/10.15421/112255>

7. Денисюк, Г. І., & Дідура, Р. В. (2019). Accumulation of heavy metals in road landscape engineering systems. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія «Географічні науки»*. №10, 130-136.
8. Дідура, Р.В. (2020). Вміст важких металів у дорожніх ландшафтно-інженерних системах (на прикладі автотраси Київ-Одеса). *East European science journal*. (53), 22-26.
9. Дідура, Р.В. (2019). Геохімічні дослідження дорожніх ландшафтів. *Наукові записки Вінницького державного педагогічного університету імені Михайла Коцюбинського. Серія: Географія*. (31), 3-4, 74-80.
10. Кравцова, І., Сонько, С., Василенко, О., Гурський, І., & Огілько, С. (2024). Формування біоценозів у придорожніх ландшафтах Черкаської області. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»*, (61), 313-328. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-25>
11. Купчик, О. & Дерій, Ж. (2016). Екологічний стан придорожньої смуги за біоіндикаційними та хімічними показниками. *Технічні науки та технології*. 2, 221-228.
12. Маринич, О. М., & Шищенко, П. Г. (2005). *Фізична географія України*. Київ: Знання. 511.
13. Ogilko, S. P. (2023). Zoning of highways of the Cherkasy region according to the degree of formation of ecosystem relations. *Man and Environment. Issues of Neoeology*, (39), 33-41. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2023-40-03>
14. Огілько, С.П. (2023). Програма моніторингового дослідження лінійних елементів інфраструктури на прикладі автотраси Київ-Одеса. XXIX Міжнародна науково-практична конференція «Modern scientific trends and youth development», 25-28 липня 2023 р., Варшава, Польща. <https://doi.org/10.46299/ISG.2023.1.29>
15. Огілько, С.П. (2023). Формування придорожніх екосистем – чергове свідчення непорушності біосфери: головні висновки моніторингового дослідження автошляхів. *The Norwegian journal of development of the international science*. No 114/2023-august 19, 3-10. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8249380>
16. Пересадько, В., Дмитриков, О., & Джос, А. (2024). Аналіз точності картографічної інформації (на прикладі відображення автомобільних шляхів України і США). *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії*, (40), 32-44. <https://doi.org/10.26565/2075-1893-2024-40-04>
17. Усманова, Г. О., & Мельник, А. І. (2010). Забруднення важкими металами ґрунтів та овочевої продукції в зоні автотраси. *Агроекологічний журнал*. №1, 25–30.
18. Ходан, Г. Д. (2012). Еколого-геохімічна оцінка дорожніх геосистем Чернівецької області. *Науковий вісник Чернівецького університету: збірник наукових праць Чернівці*. Вип. 614-615, 112-117.
19. Чикайло, Ю. І. (2013). Еколого-географічний аналіз транспортного коридору (на прикладі автомагістралі Львів – Краковець): автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. геогр. наук. Львів. 20.
20. Юрченко, В. А. Мельникова, О.Г., & Ячник, М.В. (2014). Исследование поверхностных сточных вод автомобильных дорог и дорожно-инфраструктурных комплексов. *Автошляховик України*. 5, 43-48.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Road landscape and engineering system Kyiv-Odesa: functioning, current geochemical state, problems of rational use

Hrigroriy Denysyk¹

DSc (Geography), Professor, Department of Geography,

¹ Vinnytsia State Pedagogical University named after Mykhailo Kotsiubynsky, Vinnytsia, Ukraine;

Liudmyla Ataman¹

PhD (Geography), Associate Professor, Department of Geography;

Bogdan Denysyk¹

PhD (Geography), Senior Lecturer, Department of Geography

ABSTRACT

Formulation of the problem. The Kyiv-Odesa road landscape engineering system, one of the most powerful within Ukraine, is an optimal model for detailed studies of such status. Research into the unique history of the formation of the Kyiv-Odesa DLF, its modern structure and properties, the manifestation of adverse processes, and the development of measures to optimize them has significant scientific and practical significance, and will also be an incentive for conducting similar studies of other DLFs of Ukraine.

The goal is to study the features of formation, functioning and current geochemical state of road and adjacent landscapes for their further rational use using the example of the most powerful landscape and engineering system Kyiv-Odesa in Ukraine.

Methods. In the process of research, landscape: dynamic, geochemical and ecological approaches and their corresponding methods: field landscape research, analysis and synthesis, historical and geographical, cartographic and modeling were applied. GIS technology methods were used as cross-cutting ones.

Main Results. It is noted that road landscapes, especially their more widespread and dynamic landscape and engineering systems, are paid little attention by geographers and landscape scientists of Ukraine. It is shown that in the structure of modern road landscapes of Ukraine it is advisable to distinguish three of their components (subsystems): road landscape-engineering systems and road landscape-technogenic, which are often combined under the general name road

landscape-engineering systems and non-functioning road landscapes – non-operating road systems that are not supported by man and develop according to natural laws. During 2018-2021, geochemical studies were conducted on the content of heavy metals (zinc, lead, cadmium and copper) in soil and snow cover, their migration and accumulation in roadside strips of the actively operating Kyiv-Odesa road landscape-engineering system. It was established that here heavy metals actively accumulate in soil and snow cover, only cadmium accumulates, which is self-purified in the soil. In some natural areas of the Kyiv-Odesa DLF, anomalous areas were identified, where the zinc and lead content exceeded the MPC norm by 2-3 times. 4 zones of heavy metal pollution were identified: intensive pollution (0-5 m from the roadway); medium pollution (5-10 m); weak pollution (10-15 m) and relatively clean (more than 20 m from the highway).

Conclusions. In general, despite its capacity, the Kyiv-Odesa road landscape and engineering system is not critically polluted with heavy metals, which indicates its ability to self-clean. It is noted that in the future, more attention should be paid not only to geochemical and ecological, but also to their geophysical, recreational, and aesthetic problems of the functioning of road landscapes.

Keywords: highway, road landscape, road landscape and engineering system, geochemical studies, roadside ecozones, rational use.

References

1. Vanchura, R. N. (2011). *Experimental studies of the content of heavy metals in the protection zones of highways. Geodesy, cartography and aerial photography.* 75, 110-114 [in Ukrainian].
2. Galahan, O. O. (2014). Using GIS in modeling the primary field of heavy metal pollution in highway areas. *Visnyk of Lviv University. Geographical Series.* 48, 75-79 [in Ukrainian].
3. Galahan, O. O. (2013). Modeling the distribution of heavy metals in highway geosystems. *Physical Geography and Geomorphology.* 2, 28-33 [in Ukrainian].
4. Denysyk, G. I. (1998). *Anthropogenic landscapes of Right-Bank Ukraine: monograph.* Vinnytsia: Arbat. 292 [in Ukrainian].
5. Denysyk, G. I. & Valchuk, O. M. (2005). *Road landscapes of Podillia.* Vinnytsia: PP «Publishing house «Teza». 178 [in Ukrainian].
6. Denysyk, H., Valchuk-Orkusha, O., Kanska, V., Kanskiy, V. & Kozynska, I. (2022). Ecozones of road landscape-engineer systems: structure, typology, significance. *Journal of Geology, Geography and Geoecology.* 31, 4, 591-600. <https://doi.org/10.15421/112255>
7. Denysyk, G. I. & Didura, R. V. (2019). Accumulation of heavy metals in road landscape engineering systems. *Scientific Bulletin of Kherson State University. Series «Geographical Sciences».* 10, 130-136.
8. Didura, R. V. (2020). Heavy metal content in road landscape engineering systems (on the example of the Kyiv-Odesa highway). *East European science journal.* 53, 22-26 [in Ukrainian].
9. Didura, R. V. (2019). Geochemical studies of road landscapes. *Scientific notes of the Mykhailo Kotsiubynsky Vinnytsia State Pedagogical University. Series: Geography.* 31, 3-4, 74-80 [in Ukrainian].
10. Kravtsova, I., Son'ko, S., Vasylenko, O., Gursky, I. & Ogilko, S. (2024). Formation of biocenoses in roadside landscapes of Cherkasy region. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology",* (61), 313-328. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-25> [in Ukrainian].
11. Kupchik, O. & Derii, Zh. (2016). Ecological state of the roadside strip by bioindication and chemical indicators. *Technical sciences and technologies.* 2, 221-228 [in Ukrainian].
12. Marynych, O. M. & Shyshchenko, P. G. (2005). *Physical Geography of Ukraine: Kyiv: Znannia.* 511 [in Ukrainian].
13. Ogilko, S. P. (2023). Zoning of highways of the Cherkasy region according to the degree of formation of ecosystem relations. *Man and Environment. Issues of Neocology,* (39), 33-41. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2023-40-03>
14. Ogilko, S. P. (2023). Program for monitoring research of linear elements of infrastructure on the example of the Kyiv-Odesa highway. *XXIX International Scientific and Practical Conference "Modern scientific trends and youth development",* July 25-28, 2023, Warsaw, Poland. <https://doi.org/10.46299/ISG.2023.1.29> [in Ukrainian].
15. Ogilko, S. P. (2023). Formation of roadside ecosystems - another evidence of the integrity of the biosphere: main conclusions of the monitoring study of highways. *The norwegian journal of development of the international science.* No 114/2023-august19, 3-10. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8249380> [in Ukrainian].
16. Peresadko, V., Dmytrikov, O. & Jos, A. (2024). Analysis of the accuracy of cartographic information (on the example of mapping highways in Ukraine and the USA). *Problems of Continuing Geographic Education and Cartography,* (40), 32-44. <https://doi.org/10.26565/2075-1893-2024-40-04> [in Ukrainian].
17. Usmanova, G. O. & Melnyk, A. I. (2010). Heavy metal contamination of soils and vegetable products in the highway zone. *Agroecological journal.* 1, 25-30 [in Ukrainian].
18. Khodan, G. D. (2012). Ecological and geochemical assessment of road geosystems of Chernivtsi region. *Scientific Bulletin of Chernivtsi University: Collection of Scientific Works Chernivtsi.* 614-615 [in Ukrainian].
19. Chikaylo, Y. I. (2013). Ecological and geographical analysis of the transport corridor (on the example of the Lviv-Krakowets highway): author's abstract of the dissertation for the degree of candidate of geographical sciences. *Lviv.* 20 [in Ukrainian].
20. Yurchenko, V. A., Melnikova, O. G. & Yachnik, M. V. (2014). Study of surface wastewater of highways and road infrastructure complexes. *Highway of Ukraine.* 5, 43-48.

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 25 March 2025

Accepted 30 April 2025

The role of landscape in the formation of river flow in the Nakhchivan autonomous republic

Leyla Ibrahimova¹

PhD (Geography),

¹ Nakhchivan State University, Nakhchivan, Azerbaijan,

e-mail: leylaibrahimova@ndu.edu.az,  <https://orcid.org/0009-0005-3955-1074>;

Huseyn Imanov²

Head of the Student Affairs and Events Organization Sector,

² Nakhchivan State University, Nakhchivan, Azerbaijan,

e-mail: huseynimanov@ndu.edu.az,  <https://orcid.org/0000-0002-1830-8551>

ABSTRACT

Problem definition. In order to fully and rationally use water resources (irrigation of arid territories, water supply of the population, etc.), it is necessary to develop the most effective ways of studying river runoff and its components, identifying patterns of its formation and passage, as well as finding ways of its rational use. From this point of view, the patterns identified by the author, as well as the interrelations of river runoff elements and natural factors, acquire important scientific and practical significance and allow us to determine the nature of runoff formation, its intra-annual and long-term distribution across the territory and altitudinal zones.

Analysis of recent research. Unlike other natural resources, water resources have the ability to constantly renew themselves due to the moisture cycle in nature. This creates confidence in sufficient water supply for all human needs in the future. Meanwhile, the water resources of the republic are limited. Situated in the middle and lower reaches of two interstate rivers, the Kura and the Araz, it has an influx of river waters from neighboring countries: Turkey, Iran, Georgia, Armenia, and Dagestan. The river flow formed on the territory of the republic is very small. Reservoirs of long-term and seasonal regulation created on rivers to some extent solve the problem of irrigation. However, the issue of providing water to the population of cities, villages and urban-type settlements remains urgent today.

Formulation of the purpose of the article. Continuously changing in space and time during the water cycle in nature, all sources of water resources (precipitation, runoff, evaporation) are closely interconnected.

Studying the formation of river runoff in any mountainous country is associated with a number of difficulties caused by sharp contrasts in natural conditions. Without taking into account the interaction of these factors and their influence on river runoff, it is unlikely that it is possible to identify the main patterns of change in runoff and its components

The main material of the research. During the research, we used field research methods and modern methods. We also used materials from other researchers.

Conclusions. As a result, the following landscape-hydrological regions were distinguished in the Nakhchivan natural region. 1. Zangezur-Deralayaz landscape-hydrological region; 2. Shahbuz-Ordubad landscape-hydrological region; 3. Arazboyu landscape-hydrological region. During the analysis of the density of the river network by landscape, we determined that this indicator also affects the socio-economic infrastructure located in hydrological regions.

Keywords: climate action, landscape, global warming, river flow, ArcGIS, hydrological map, landscape-hydrological region, natural region

In cites: Ibrahimova Leyla, Imanov Huseyn (2025). The role of landscape in the formation of river flow in the Nakhchivan autonomous republic. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (62), 184-193. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-14>

Introduction. At the modern stage of hydrology, rivers are considered as a result of the development of the geographical landscape [2]. As various physical and geographical factors (climate, relief, soil, vegetation cover and geological structure) that are closely related to each other change [21], the morphometric indicators of the river network, the water regime and flow of the river also change [8].

The discovery of structural regularities of the river network, the study and generalization of the flow characteristics of various phases of the river regime should be based on the relationships with the qualitative and quantitative indicators of physical and geographical factors. Such a genetic approach is of both theoretical and practical importance [9]. It is precisely this type of relationship that forms the basis

of modern hydrological and water management calculations, as well as hydrological forecasting methods [1].

The degradation of natural landscapes as a result of the influence of anthropogenic factors is reflected both in the regime of rivers and in their flow characteristics [3]. The construction of reservoirs and the laying of canals leads to a change in the hydrographic network, as well as the river regime [11]. Therefore, the results of landscape-hydrological studies are also used in solving the issues of planning the use of water resources and their management.

The landscape types of the basin should also be taken into account in the optimal placement of hydrological observation points in the river network [14]. The detection of rivers with zonal and azonal

regimes, the study of their regime characteristics, flow and time indicators require a landscape-hydrological approach.

The logical conclusion of the study of rivers as a landscape element should be the landscape-hydrological zoning of the territory [15]. Such zoning is of practical importance in solving the above-mentioned hydrological problems [20].

In general, the Nakhchivan natural region differs sharply from other regions of the republic in terms of its natural climatic conditions. Many of the problems indicated for this region, for example, the dependence of morphometric and flow indicators of rivers on various physical and geographical factors, have been reflected in the studies of S.H. Rutamov, R.M. Qashqai, M.A. Mammadov, R.Kh. Piriyeu and others. However, the analysis of the location of hydrological observation points taking into account landscape types, landscape and hydrological zoning of the territory have not been practically carried out.

Landscapes are the reasons that directly or indirectly affect the formation of river flow [5]. All physical and geographical factors that affect the regime and flow characteristics of rivers are divided into two types: climatic and surface factors.

The distribution of climatic factors over the territory is related to the nature of climatic zones and atmospheric circulation [4]. Therefore, these types of factors are subject to the law of zonality [6].

Physical-geographical factors can be divided into two groups, taking into account the rate of their change over time: meteorological or rapidly changing factors (atmospheric precipitation, evaporation, humidity and other meteorological elements), landscape or slowly changing factors (climate, orography, lakes, glaciers, morphometric indicators of the basin). Landscape or slowly changing factors mainly include factors of the basin surface. These factors are mainly related to the lithosphere. Since the temporal variability is very weak, it is considered that they do not change at all for several decades.

The relief of the basin has a certain effect on the flow. In this regard, the following relief indicators are of greater interest: the average height of the watershed above the ocean level, the range of elevation changes in the basin, the degree of fragmentation of the territory, the exposure of the slopes [7].

Elements of the relief affect the distribution of the three main climatic elements over the territory, which indirectly or directly affects the landscapes [12]. These include precipitation, evaporation and air temperature [13]. These, in turn, determine the change in surface and underground accumulations of the river flow over time and area [19]. Relief elements affect the conditions for the formation of the flow by changing the speed of stream jets on the surface of the watershed, the duration of water runoff in

the channel and on the slopes [18]. They also affect the processes of snow accumulation and melting in the basin, infiltration and accumulation of liquid precipitation. It is extremely important to study the impact of landscapes on the rivers of the Nakhchivan Autonomous Republic, which is distinguished by its arid and continental climate. The main reason for this is that the future sustainable and sustainable development of the agrocenoses developed here depends on this.

Research object. The rivers of the Nakhchivan Autonomous Republic play an important role in the development of the region. Most of the rivers here are small mountain rivers. The river network is more developed in the mountainous part, which is due to the high amount of precipitation. Since the humidity is higher in areas at an altitude of 1000-2500 m, the river network is partially well developed. In areas above 2500 m, the decrease in precipitation, the poor development of forests, plants and soil cover lead to the reduction of the river network here. In this zone, groundwater emerges in the form of numerous springs. In areas above 3000 m, the relief is mainly bare and rocky, and atmospheric sediments are relatively small, so the river network is poorly developed. In areas above 2500 m, the density of the river network decreases to 0.10 km/km². The main reason for the poor development of the river network in the foothills and plains below 1000 m is the lack of precipitation in this zone, intensive evaporation, and rapid absorption of river waters into sedimentary rocks. Landscapes significantly affect the formation and speed of river flow. The fact that Nakhchivan Autonomous Republic has a sharply continental climate, low precipitation, dry weather, partly rainless and warm summer and autumn months, cold winter, high temperature amplitude differences between days and seasons, has affected the formation of vegetation and led to the development of weak monotypic, that is, xerophytic plants. Therefore, the Araz-bound plain and foothills of Nakhchivan natural region belong to the semi-desert zone. This area covers an area up to 1200 m in altitude and extends from the northwest to the southeast. The semi-desert zone is especially extensive in the Sadarak, Sharur, Boyukduz and Nakhchivan plains, and covers a narrow area in the southeastern end - in the Ordubad plains. Due to the low-rainfall continental climate of the Middle Araz Depression and the Araz Ranges region and the lack of favorable relief conditions for the development of large river basins, the rivers flowing through the territory of the Nakhchivan Autonomous Republic are mainly low-water and small rivers. Due to the absence of a forest landscape in the territory of Nakhchivan, the density of the river network is mainly weak.

Research method. The research work used hydrological data, landscape, climate, and elevation

maps for the years 1928-2022. Maps were prepared in the ArcGIS program for accurate results during the research process. Information on river water consumption was taken from the periodic releases of the State Water Cadastre and the data of the National Hydrometeorology Department. Zonal-hydrological, geographical-hydrological, geographical interpolation, Horton method, comparative and statistical mathematical methods were used in the dissertation. For the first time, landscape-hydrological zoning of the Nakhchivan Autonomous Republic was carried out depending on the landscapes and a corresponding map was compiled.

Analysis and discussion. The hydrological regime of our study area is very different from that of other regions of our republic. The first reason for this is the relief, climate, in other words, natural conditions. Thus, the fact that our country consists of mountains and plains has led to a more diverse hydrological regime in these regions. Unlike our study

area, a large number of floods and mudflows are observed here. For this reason, our study area has very favorable natural conditions.

In the study area, neighboring river basins located under the same climatic conditions, but with different relief, soil and vegetation, can be completely different in terms of both quantity and quality of flow. In Nakhchivan, increasing altitude leads to an increase in climatic features. The diversity of natural conditions on the mountain slopes, the interaction of individual components is reflected in the formation of various landscape types. The following landscape types exist in the Nakhchivan natural region: 1. Nival and partially nival-glacial landscape of the high mountains, 2. Alpine, subalpine and meadow-steppe landscape of the high mountains, 3. Subalpine meadow, 4. Mountain-xerophyte landscape of the middle mountains, 5. Semi-desert landscape of the lowlands and intermontane plains (Figure 1).

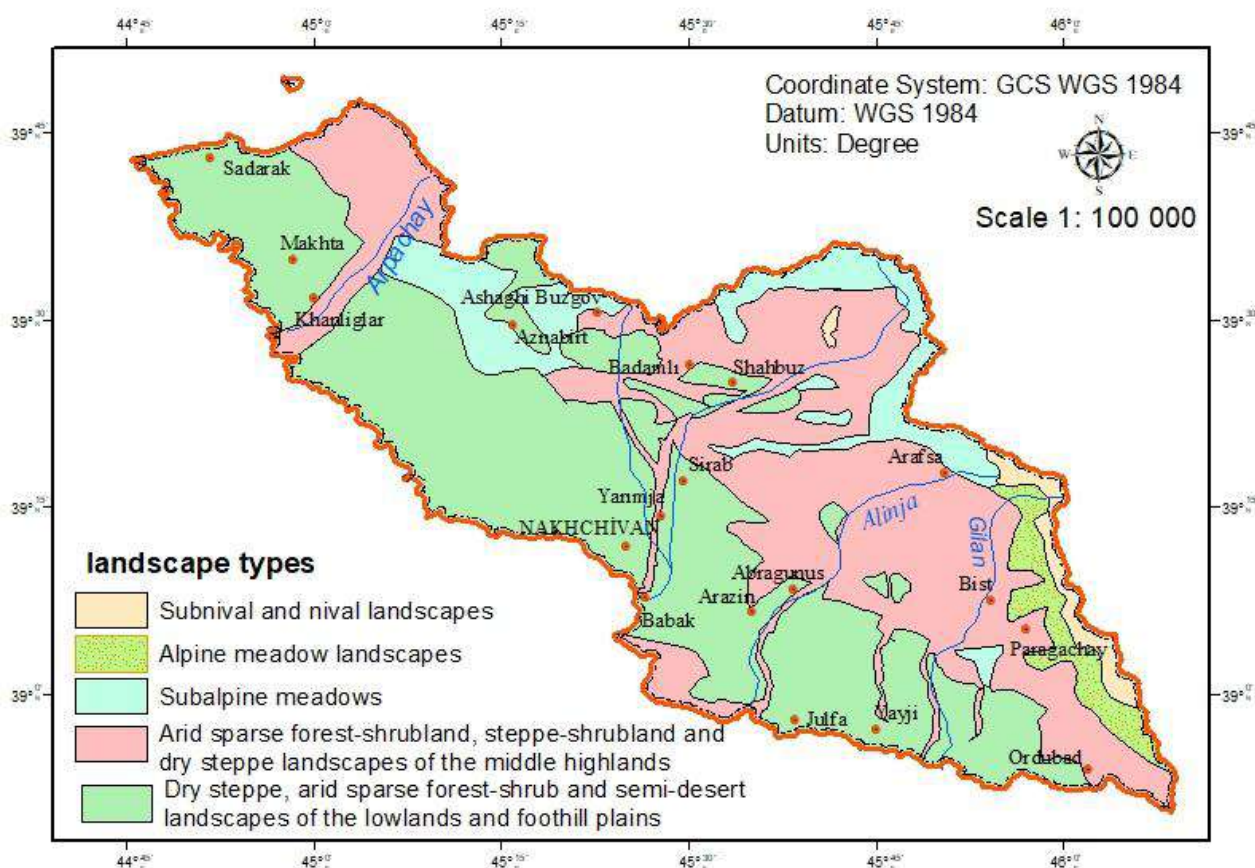


Fig. 1. Landscape map

A group of authors believe that during hydrological studies, it is necessary to take into account not the general zonality, but the specific features of the landscapes in the basin, since the reason for the specialization of each landscape is the geological-geomorphological characteristics of the territory.

It is known that the role of various morphological landscapes in the structure of the natural terrain

complex is different. Some of them are widespread and occupy a relatively large area, while others are of dependent significance and are rarely found. Therefore, the decision on which landscape type of the basin to conduct hydrological observation should be based on landscape studies.

Although mountain rivers are usually not long, they flow in several different landscape belts. The-

refore, the share of the area occupied by each landscape belt or type in the total area of the basin should be determined separately. Then the role of each of them in the formation of the flow should be assessed separately.

The hydrological characteristics of the landscape depend on the joint effect of the regularity of fluctuations in climatic factors and the discrete properties of the basin surface. Seasonal fluctuations are characteristic of the hydrological characteristics of the landscape. Thus, during the period of snow cover, the albedo coefficient of the surface and the radiation balance change sharply. From this point of view, when studying the hydrological regime, it is advisable to consider the warm and cold periods separately. In the warm period of the year, the hydrological characteristics of the landscape become more contrasting.

One of the characteristic forms of mountainous terrain landscapes is various stony surfaces, which are either rocky or stony-crusts. The porosity of the stony-crusts surface is large, the moisture capacity is weak, and the capillary connections are dense. From a hydrological point of view, such a surface is more favorable and does not create conditions for the formation of avalanches and floods. The lithological and tectonic features of rocky areas, on the one hand, regulate the groundwater flow by changing the ratio of groundwater and surface flows, and on the other hand, increase the flow velocity, causing flash floods.

In the mountain meadow landscape, the surface has different types of soil and plant cover. Therefore, the difference in infiltration in different areas complicates the hydrological regime in high-altitude zones.

In the cold season, evaporation on grassy slopes is 2.8-3.2 times less than in coniferous forests, and in the warm season – 1.5-1.7 times less, which affects the amount of runoff.

Hydrological zoning is based on the basic laws of physical geography and there is a close genetic connection between them. Therefore, special attention should be paid to physical-geographical zoning. There are two main types of physical-geographical zoning: zoning by physical-geographical components and complex physical-geographical zoning. There are also two main types of hydrological zoning: zoning by hydrological elements and complex hydrological zoning. In both physical-geographical and hydrological zoning, the principles of complexity, relative homogeneity, genetic uniformity, and territorial integrity are taken into account.

The physical-geographical zoning of Azerbaijan belongs to M.A. Museyibov and B.A. Budagov. A.M. Shikhlinski and V.G. Zavriyev developed a hydrological zoning scheme based on this zoning. They proposed various hydrological zoning schemes for Azerbaijan, but did not provide a scientific and critical review of them. It should be noted that the author of the

first comprehensive hydrological zoning scheme for Azerbaijan was S.H. Rustamov.

For the first time, schemes were developed for the elements of the water balance of the Qashqai R.M. river basins, M.A. Mammadov for the degree of flooding of rivers, and F.A. Imanov for the conditions for the formation of the minimum flow and the synchronicity of fluctuations in the minimum water consumption. However, neither the landscape-hydrological zoning scheme for the whole of Azerbaijan nor for its individual natural regions has been developed so far. Such zoning can be useful for solving many practical problems:

1. Assessment of the role of various landscape types in the formation of river flow;
2. Calculation and forecast of various characteristics of river flow;
3. Correct placement of the network of hydrological observation points;
4. Planning and management of water resources use.

Although the landscape types common in the river basin transform atmospheric precipitation into river flow, only a geographical-hydrological analysis of the landscape allows us to obtain a general idea of the hydrological characteristics of a particular region. However, the identification of objective relationships between the indicators of the landscape type and the characteristics of the river flow is already of practical importance.

In general, the determination of the boundaries of hydrological regions is one of the controversial issues. Improper border crossing results in a violation of the homogeneity of the hydrological region. Therefore, both qualitative and quantitative indicators were used in the proposed landscape-hydrological zoning. Taking all this into account, the following landscape-hydrological regions can be distinguished in the Nakhchivan natural region:

1. Zangezur-Deralayaz landscape-hydrological region. This region is located in the intensively fragmented highland nival and partially nival-glacial landscapes and highland alpine meadows, meadow-steppe landscape belt. The relief in the nival and partially nival-glacial landscape is intensively fragmented. Gravity-denudation processes are characteristic. Snow, single-track valley (trough), moraine glacial relief forms are widespread. It has a mountainous tundra climate. The average temperature in January is from -15°C to -8.5°C, in July 4-9°C, Annual precipitation is 800-1200 mm. Soil cover is underdeveloped. Very rare rocky-gravel plants, rock goat in the highlands, Dagestan tour in Azerbaijan, some species of birds and rodents are found. In the alpine meadows and meadow-steppe landscape of the high mountains, grassy mountain-meadow soils are mainly distributed. The Zangezur range covers altitudes from 2000-

2200 m to 3000 m. It is composed mainly of carbonate-terrigenous, volcanogenic, tuffaceous sediments of the Jurassic and Chalk. It has a sharply dissected relief. The mountains are of denudation-structural origin. Strong floods occur here from time to time. Floodplains are mainly located in the area of rocky and mountain meadows. River valleys are mainly beginning to form in this landscape area. The climate is cold. The average temperature in January is from -12°C to -7°C , in July $8-17^{\circ}\text{C}$. Annual precipitation is up to 900 mm. Dagestan tur, black grouse, bezoar goat, rodents (marsh vole, mountain vole), blind mole, Caucasian skunk, Caucasian tetra, vulture, rock lizard, etc. are settled. It is divided into alpine, subalpine meadows and meadow-steppe subtypes. Alpine meadows are located above 2400-2500 m. The height of the plants is very short, there are few species. Below the alpine meadows, at an altitude of 2000-2200 m to 2400-2500 m, a strip of subalpine meadows stretches. Subalpine meadows consist of tall perennial plants, which are rich in species, mainly forage grasses.

The rivers flowing from the Zangezur range form a dense network. The river network is more developed in the mountainous part, which is due to the excess precipitation. Since the humidity is higher in

areas at an altitude of 1000-2500 m, the river network is partially well developed. In areas above 2500 m, the decrease in precipitation, the poor development of forests, plants and soil cover lead to the reduction of the river network here. In this zone, groundwater emerges in the form of numerous springs. In areas above 3000 m, the relief is mainly bare and rocky, and atmospheric sediments are relatively small, so the river network is poorly developed. The density of the river network in some river basins (Nakhchivanchay, Alinjachay, Gilanchay) in areas above 2500 m decreases to 0.10 km/km^2 . The main reason for the poor development of the river network in the foothills and plains below 1000 m is the low rainfall in this zone, intensive evaporation, and rapid absorption of river waters into sedimentary rocks [2].

All rivers of Nakhchivan province are included in the Araz basin. In the central and southeastern part of the territory, rivers originate from the steep slopes of the Zangezur and Daralayaz ranges.

In the high mountainous belt, the air temperature varies between $1-2^{\circ}$ at an altitude of 2500-3000 m. In the highest mountainous part (3500 m), located in the southwest of the Zangezur range, the average annual temperature drops to -4° (Figure 2).

The water regime of the rivers in this region is

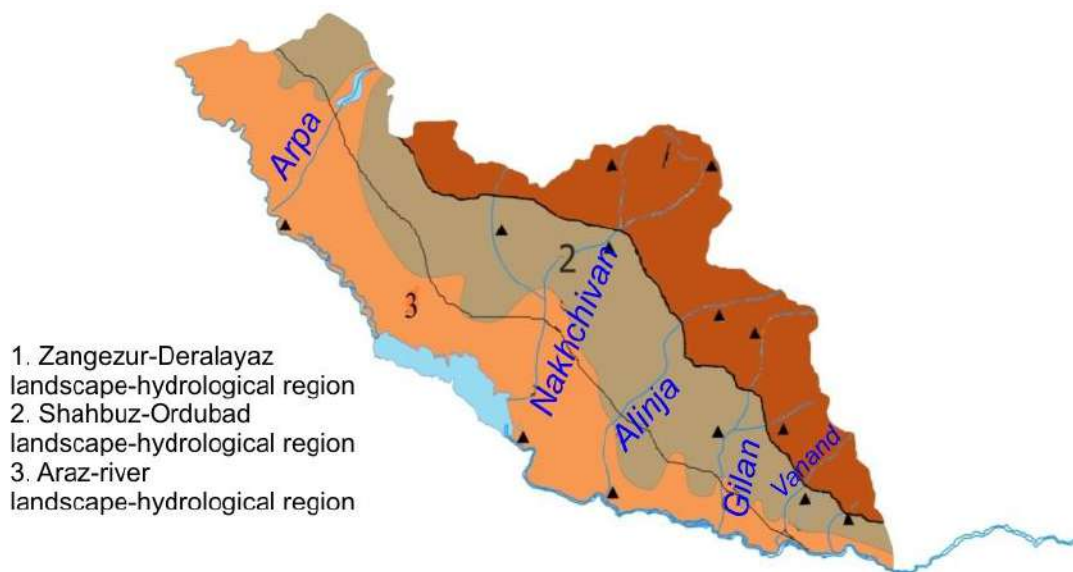


Fig. 2. Map-scheme of landscape-hydrological zoning of the Nakhchivan natural region

characterized by spring-summer high water, rain floods, summer-autumn and winter low water periods. The high water period covers the months of March-June. During this period, 45-70% of the annual flow passes.

For the Nakhchivanchay-Garababa settlement, 1949 is characterized as a low-water year, 1972 as an average-water year, and 1958 as a high-water year. In the low-water year, the start date of the summer-autumn low-water period coincided with 23.VIII and

the end date with 27.X, and 66 days were observed. No floods were observed in the low-water year. In the low-water year, the high-water period lasts from 01.III to the summer-autumn low-water period, and the maximum water flow was $25.5 \text{ m}^3/\text{s}$. In the average-water year, these quantities are 04.VIII, 07.X, and 65 days, respectively. In the high-water year, characterized as 1958, the summer-autumn low-water period began on 16.VII, ended on 09.X, and lasted 86 days. In the average water year, the flood period

lasts from 16.III month to 01.III month in the high-water year, and their maximum water discharges were $41.7\text{m}^3/\text{s}$ and $79.4\text{m}^3/\text{s}$, respectively. In the average water year, there were no floods in the 3-time high-water year (Figure 3, 4, 5).

2. Shahbuz-Ordubad landscape-hydrological region. This region is located in the mountain-xerophyte landscape belt of the middle highlands. It developed in the Zangezur and Daralayaz ranges in the Nakhchivan Autonomous Republic. The middle highland belt occupies the northwestern, central and southeastern parts of the region. It was formed

mainly on volcanogenic, volcanogenic-sedimentary rocks of the Paleogene. It covers altitudes from approximately 1100 m to 2000 m. A cold climate prevails. The average temperature in January is from -5°C to -4°C , in July from 18°C to 25°C , annual precipitation in the Nakhchivan Autonomous Republic is 400-500 mm. The dry summer in the area has led to the formation of a xerophyte landscape. Mountain-chestnut and brown mountain-forest soils are widespread. The vegetation is of the mountain-xerophyte (phryganoid) type (cave, tistis, etc.). The average annual air temperature is $5-8^{\circ}\text{C}$.

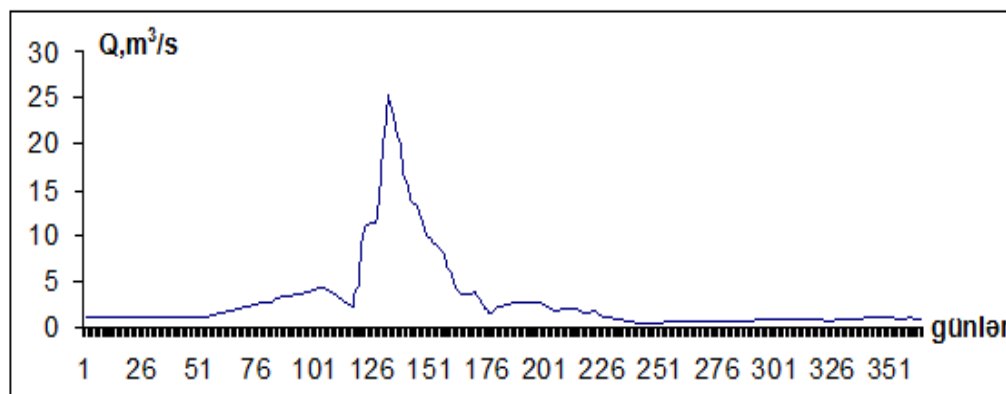


Fig. 3. Hydrograph of the Nakhchivanchay-Garababa region for 1949 (low-water year)

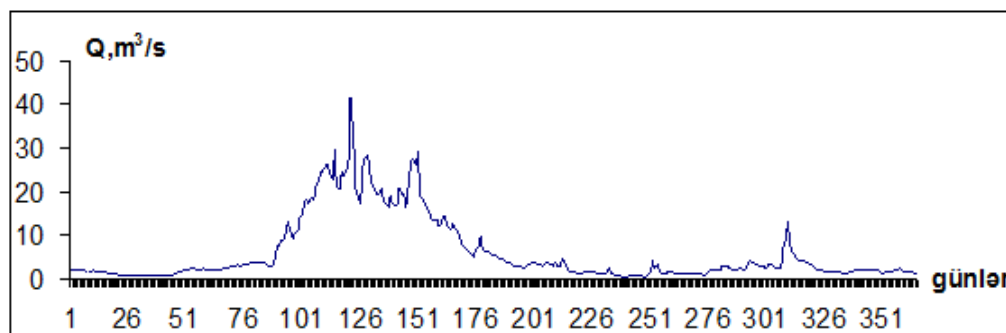


Fig. 4. Hydrograph of the Nakhchivanchay-Garababa region for 2022 (mid-water year)

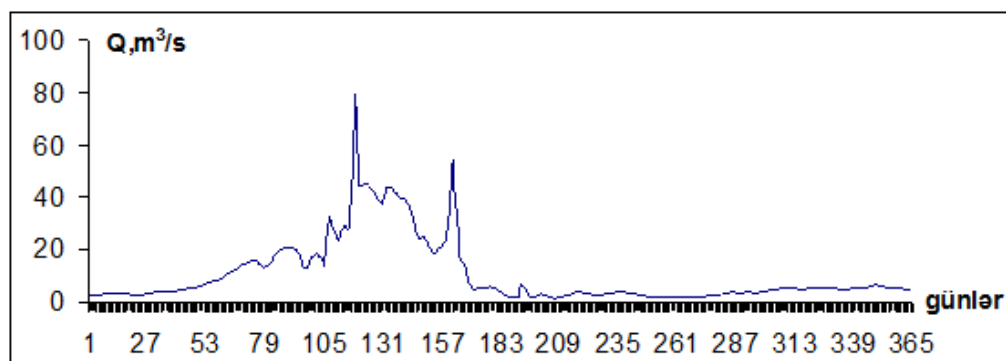


Fig. 5. Hydrograph of the Nakhchivanchay-Qarababa region for 2022 (high-water year)

3. Araz-river landscape-hydrological region. This region is located in the semi-desert landscape belt of lowlands and intermontane plains. This landscape zone in the Republic of Azerbaijan has the largest area (approximately 25% of the territory). It

covers the Araz-bound plains of the Nakhchivan Autonomous Republic. The altitude is up to 600-1000 m. It is composed of alluvial-proluvial deposits of the Anthropocene, alluvial, proluvial-deluvial deposits of the Holocene. It has a cold semi-desert and dry

steppe climate. Summer is dry. The average temperature in January is from -4°C to 2°C , in July from 23°C to 28°C . Annual precipitation is 130 mm-300 mm. Gray-meadow, gray, gray-brown, etc. soils are widespread. Semi-desert plants with wormwood, kengiz, wormwood-salt-leaved, and gavan are dominant.

The average altitude of the Arazboyu plain, which constitutes one third of the territory and is considered the lowest area of the republic, is about 800 meters. The annual air temperature there is $12-14^{\circ}\text{C}$ in the Arazboyu plains and low mountainous belt.

The average monthly temperature of the coldest month of the year (January) is $-6-10^{\circ}\text{C}$ in the Arazboyu plain and low mountainous part, and the average monthly temperature of the main warm month of the year (July) fluctuates between $24-28^{\circ}\text{C}$ in the plain and low mountainous belt.

In the Bilev settlement of Paragachay, the rainy period for 1972 begins in the 27th month of the fifth month and lasts until the middle of the seventh month. It covers the winter dry period from the end of the eleventh month to the beginning of the third month (Figure 5).

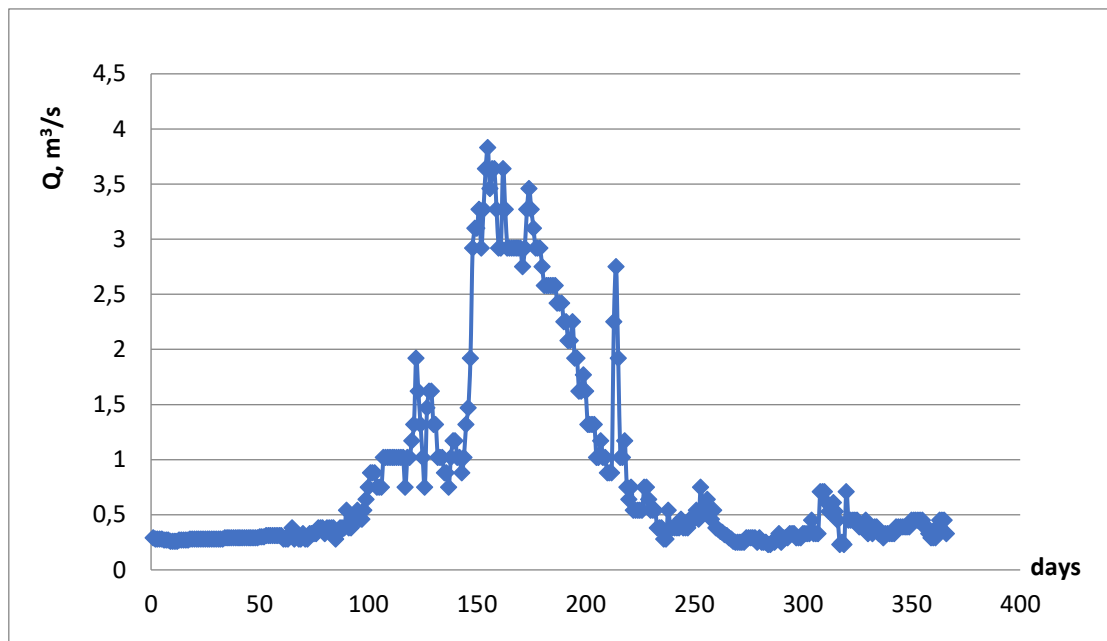


Fig. 5. Hydrograph of the Paragachay-Bilev area for 1972 (interval year)

It should be noted that the average monthly temperature in July (28°) in the plain part of the Nakhchivan region is not found anywhere else in Azerbaijan. Such high temperatures are observed only in Central Asia.

In the winter months, as a result of strong cooling, severe frosts sometimes occur here. The average absolute minimum of air temperature can drop to $-15-18^{\circ}$ in the plain and partly in the low mountainous belt.

The Araz-river belt, which forms the lower plain zone of the Nakhchivan region, covers a large area of the region located at an altitude of 600-1000 meters. This area starts from the Sadarak plain in the northwest and is squeezed by high mountains in the form of a narrow strip near Kotam in the Ordubad region to the banks of the Araz. The plain part is located between the Araz River and the low mountainous region, sometimes covering a wide and sometimes narrow area. The Araz-river plain constitutes 32% of the region's territory and connects to the Ararat plain in Armenia in the northwest. This belt is not a single plain, but in several places within the republic -

through the branches or heights of the Daralayaz and Zangezur mountains extending in the meridian direction – it is divided into a number of sloping plains (Sederak, Sharur, Boyukduz, Nakhchivan, Ordubad, etc.).

The flow recorded at the stations that can be considered satisfactory in terms of assessing the role of various landscape types in the formation of the flow is formed entirely within the same landscape type or they are located on the border of different landscape types.

A general physical and geographical justification is important in the placement of the network, taking into account geological and hydrogeological conditions. This requirement arises from the fact that the conditions for the formation of water balance elements of river basins located in different geographical regions, natural zones and altitudinal belts are different. Ignoring physical and geographical conditions when creating a network of observation stations leads to large errors in the assessment of individual components of the water balance and elements of the hydrological regime.

In hydrologically well-studied regions, when closing any station, the observation data should be analyzed. If the nearest stations have recorded a similar character of the hydrological regime, then the station with a shorter observation period can be closed or relocated to another place. To clarify this issue, the hydrographs of the considered stations for a parallel observation period can be analyzed together. Only those stations can be relocated that were incorrectly located in the past or repeat neighboring stations.

When placing stations, special attention should be paid to rivers whose regime has changed as a result of the influence of anthropogenic factors, since the number of such rivers is constantly increasing.

In order to develop the existing network of observation stations, both new stations should be opened and almost all stations that were closed in different years and for different reasons should be restored [13].

During the analysis of the density of the river network by landscape, we determined that this indicator also affects the socio-economic infrastructure located in hydrological regions. Thus, in the Zangezur-Deralayaz hydrological region, rivers affect only the location of settlements. In the Shahbuz-Ordubag hydrological region, they affect all socio-economic regions in the region, and their location and future development depend on them. We can especially note settlements and agricultural areas that suffer from water. Since the Arazboyu hydrological region passes through a plain, irrigation of agricultural areas is brought to the fore. Because the water shortage here makes this problem even more urgent. Among the mentioned hydrological regions, the majority of socio-economic facilities in the Shahbuz-Ordubad hydrological region were built on the banks of the river.

Result. 1. A hydrological map of the rivers of the area was prepared and hydrographs of the low-water, medium-water and high-water years of the Nakhchivanchay-Garababa and Paraghachay-Bilav points were compiled. The analysis of the hydrographs shows that the Nakhchivanchay is a river with spring flow, and during the flow period, 85% is surface water, and 15% is groundwater. In general, the share of surface water in the annual flow is 66%, and the share of groundwater is 34%. Paraghachay is a tributary of the Gilanchay and has spring-summer flow. The role of snow waters is great.

2. Within the framework of the analysis of the hydrological observation series, the flow characteristics of the Nakhchivan rivers were calculated, a graph of the relationship between the height of the water catchments and the flow modules was compiled, and it was determined that the flow module quantity also increases with height. Also, the errors of the series were calculated and it was determined that the relative error of the Nakhchivan rivers varied between

3.56%-6%, and the error of the coefficient of variation varied between 10.16%-12.91%. In addition, a statistical analysis of the series was carried out according to the Fisher and Student criteria. As a result, it was concluded that the results obtained for the Jagrichay-Paiz station were homogeneous according to both criteria, for the Arpa-Areni, Alinjachay-Arafsa, Paraghachay-Bilev, Kukuchay-Kuku stations according to the Student criterion, and for the Vanandchay-Danagirt station according to the Fisher criterion. Inhomogeneity was determined for both criteria for the Ordubachay-Nusnush station.

3. Difference-integral curves were constructed to determine the flow fluctuations. According to these curves, the flow decreased between 1931-1984 and increased between 1984-1997. Also, an increase in the flow was observed between 1963-1980 in the Alijachay-Arafsa section, and a decrease in the 1980s, an increase in the Gilanchay-Nurgut section was observed between 1962-1976 and a decrease in the 1976-1999, and a decrease in the flow in the Kukuchay-Kukyu section was observed between 1931-1962 and an increase in the 1962-1988 period. The increase in the flow at the Nakhchivanchay-Garababa station was observed between 1951-1978, and the decrease between 1978-1998, the decrease in the flow at the Paraghachay-Bilav station was observed between 1931-1984, and the increase between 1984-1996, the decrease in the flow at the Vanandchay-Danagirt station was observed between 1931-1972, and the increase was observed between 1972-1996. In order to make the relationship between the stations more efficient and to provide more accurate results of the calculation, a correlation matrix was compiled based on the calculated correlation coefficients. The series with less observation data were restored using the analogy method and relationships between the average annual water consumption were established.

4. The Nakhchivan natural region was studied in terms of landscape and the role of landscapes in the formation of river flows was studied. Using data from observation points located in the area, it was clarified what characteristics the river basins have in each landscape belt. Using various hydrological and geographical zoning schemes, landscape-hydrological zoning of the area was carried out. Zoning was carried out according to the zonal principle and 3 regions were distinguished. Landscape type was accepted as the main indicator of the homogeneity of these regions. Thus, the landscape type reflects both leading (relief, climate) and derived (soil and vegetation) components. The boundaries of landscape-hydrological regions were specified by taking into account the quantities of the average annual, maximum, minimum summer-autumn and winter flow modules of rivers for a multi-year period. In addition, the regime characteristics of the rivers, food sources, and the

nature of the distribution of flow throughout the year were also taken into account and the characteristics of landscape-hydrological regions were given.

As a result, the following landscape-hydrological regions were distinguished in the Nakhchivan natural region.

1. Zangezur-Deralayaz landscape-hydrological region;
2. Shahbuz-Ordubad landscape-hydrological region;
3. Arazboyu landscape-hydrological region.

The characteristics of each landscape-hydrological region were investigated and explained, and graphs and maps were compiled.

As a result of the analysis of the network of hydrological observation points in the rivers of Nakhchivan, the landscape types in which the hydrological observation points operating in different years were located were determined. The observation points were unevenly distributed across landscape types.

References

1. Abdallah, M., Mohammadi, B., Zaroug, M.A.H., Omer, A.M. (2022). Reference evapotranspiration estimation in hyper-arid regions via D-vine copula based-quantile regression and comparison with empirical approaches and machine learning models. "J. Hydrol.: Reg. Stud.", 44, 101259, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101259>
2. Abdallah, M., Zhang, K., Chao, L., Omer, A. (2024). A D-vine copula-based quantile regression towards merging satellite precipitation products over rugged topography: a case study in the upper Tekeze–Atbara Basin. "Hydrol. Earth Syst. Sci.", 28(5), 1147–1172, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108574>
3. Adeyeri, O.E., Ishola, K.A. (2021). Variability and trends of actual evapotranspiration over west africa: the role of environmental drivers. "Agric. For. Meteorol.", 308–309, 108574, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108574>
4. Aliyev, F.Sh. (2000). Groundwater of the Republic of Azerbaijan, use of its resources and geoecological problems. Baku: Elm, 326.
5. Alizade E.K., Tarikhazer S.A., Mamedov S.G., Gamidova Z.A. (2017). Anthropogenic geomorphology of Greater Baku. Baku: AFpoligrAF, 298.
6. Amanova, S.S., Hajiyeve, 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>
7. Amanova, S., Hajiyeve, 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>
8. Amanova, S., Hajiyeve G. (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>
9. Bai, H., Tao, F. (2017). Sustainable intensification options to improve yield potential and eco-efficiency for rice-wheat rotation system in China. "Field Crops Res", 211, 89–105, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.06.010>
10. Borysenko, K., Hutchinson, S. M., Sinchuk, D. (2024). Manifestations and consequences of water conflicts: case study of the Pechenihy reservoir, Kharkiv region, Ukraine. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology", (60), 173–187. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-12>
11. Budagov, B.A., Mikayilov, A.A. (1996). Physical-geographical (landscape) zoning. Constructive geography of the Republic of Azerbaijan. Baku: Elm, 185.
12. Elbeltagi, A., Aslam, M.R., Malik, A., Mehdinejadi, B., Srivastava, A., Bhatia, A.S., Deng, J. (2020). The impact of climate changes on the water footprint of wheat and maize production in the Nile Delta. "Egypt Sci. Total Environ.", 743, 140770, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140770>
13. Hajiyeve, A.Z., Hajiyeve, G.N., Jafarova, F.M. (2024). Structural-genetic characteristics of landscapes of the south-eastern slope of the Great Caucasus and study of their modern state. "Comptes rendus de l'Acad'emie bulgare des Sciences", 77(1), 32–72, <https://doi.org/10.7546/CRABS.2024.01.08>
14. He, M., Ren, T., Jin, Z.D., Deng, L., Liu, H., Cheng, Y.Y. (2023). Precise analysis of potassium isotopic composition in plant materials by multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry Spectrochim. "Acta Part B: At. Spectrosc.", 106781, <https://doi.org/10.1016/j.sab.2023.106781>
15. Houma, A.A., Kamal, R., Mojid, A., Fikri, A., Abdullah, B. (2021). Climate change impacts on rice yield of a large-scale irrigation scheme in Malaysia. "Agric. Water Manag.", 252, 106908, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106908>
16. Imanov, F.A. (2014). Theoretical foundations of hydrology. Baku: BSU Publishing House, 212.
17. Imanov, F.A. Verdiyev, R.H., Aghayev, Z.B., Humbatova, S.Y. (2012). Water resources of the rivers of East Azerbaijan. Baku-Elm, 183.
18. Khalilov, Sh.B. (2003). Reservoirs of Azerbaijan and their environmental problems. Baku: Elm, 210.
19. Mahmudov, R.H. (2018). Modern climate changes and dangerous hydrometeorological phenomena. Baku: Elm, 213.
20. Petik, V., Sukhov, V., Sokolov, V., Iegupov, V., Goodary, R., & Pribilova, V. (2024). Strengthening the role of hydrogeological research in the system of engineering investigations for construction. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography", (60), 68–79. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-05>

21. Uhl, A., Melnyk, O., Melnyk, Y., Manko, P., Brunn, A., & Fesyuk, V. (2024). Remote sensing monitoring of changes in forest cover in the Volyn region: a cross section for the first two decades of the 21st century. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*, (60), 272-283. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-19>

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Роль ландшафту у формуванні річкового стоку в Нахічеванській автономній республіці

Лейла Ібрагімова¹

доктор філософії з географії,

¹ Нахічеванський державний університет, Нахічевань, Азербайджан;

Хусейн Іманов¹

Керівник сектору у справах студентів та організації заходів,

² Нахічеванський державний університет, Нахічевань, Азербайджан

Для повноцінного та раціонального використання водних ресурсів (зрошення посушливих територій, водопостачання населення тощо) необхідно розробити найефективніші способи вивчення річкового стоку та його складових, виявлення закономірностей його формування та проходження, а також пошуку шляхів його раціонального використання. З цієї точки зору, закономірності, виявлені автором, а також взаємозв'язки елементів річкового стоку та природних факторів, набувають важливого наукового та практичного значення та дозволяють визначити характер формування стоку, його внутрішньорічний та багаторічний розподіл по території та висотним зонам. На відміну від інших природних ресурсів, водні ресурси мають здатність постійно оновлюватися завдяки кругообігу вологи в природі. Це створює впевненість у достатньому водозабезпеченні всіх потреб людства в майбутньому. Тим часом водні ресурси республіки обмежені. Розташована в середній та нижній течії двох міждержавних річок, Кури та Аразу, вона має приплив річкових вод із сусідніх країн: Туреччини, Ірану, Грузії, Вірменії та Дагестану. Річковий стік, що формується на території республіки, дуже невеликий. Водосховища довготривалого та сезонного регулювання, створені на річках, певною мірою вирішують проблему зрошення. Однак питання забезпечення водою населення міст, сіл та селищ міського типу залишається актуальним і сьогодні. Вивчення формування річкового стоку в будь-якій гірській країні пов'язане з низкою труднощів, спричинених різкими контрастами в природних умовах. Без урахування взаємодії цих факторів та їх впливу на річковий стік навряд чи можна виявити основні закономірності зміни стоку та його компонентів. В результаті в Нахічеванському природному регіоні було виділено такі ландшафтно-гідрологічні регіони. 1. Зангезурсько-Дералазський ландшафтно-гідрологічний регіон; 2. Шахбузько-Ордубадський ландшафтно-гідрологічний район; 3. Аразбойський ландшафтно-гідрологічний район. Під час аналізу густоти річкової мережі за ландшафтами ми визначили, що цей показник також впливає на соціально-економічну інфраструктуру, розташовану в гідрологічних районах.

Ключові слова: кліматичні зміни, ландшафт, глобальне потепління, річковий стік, ArcGIS, гідрологічна карта, ландшафтно-гідрологічний регіон, природний регіон.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 27 січня 2025 р.

Прийнята 27 березня 2025 р.

Impact of military conflicts on landscape transformation (a case study for the Aghdam district of the Republic of Azerbaijan)

*Mirnuh Ismayilov*¹

PhD (Geography), Assistant Professor, Head of the Landscape Science
and Landscape Planning Department,

¹ Institute of Geography of Ministry of Science and Education
of the Republic of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan,

e-mail: mirnuh.ismayilov@yahoo.com,  <https://orcid.org/0000-0003-4189-0401>;

*Irina Kuchinskaya*¹

PhD (Geography), Assistant Professor, Leading Researcher
of Landscape Science and Landscape Planning Department,

e-mail: irina.danula@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0002-7154-3446>;

*Elina Karimova*¹

PhD (Geography), Assistant Professor, Leading Researcher
of Landscape Science and Landscape Planning Department,

e-mail: bakinskiy.breeze@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0003-2651-8150>

ABSTRACT

Problem statement: The Aghdam district of the Republic of Azerbaijan, under occupation for nearly 30 years, became an area of intensive degradation of both natural and anthropogenic landscapes. The scale of destruction caused by military and technological activities has led to significant ecological, social, and economic losses. The damage to natural and anthropogenic ecosystems is estimated to exceed 200 billion US dollars. More than 50 natural monuments were destroyed, and the infrastructure of 58 rural settlements and one city were devastated. Over 90,000 mines pose a constant threat and hinder the restoration of these areas.

Objective: To conduct a landscape-oriented study aimed at assessing the consequences of military and technological activities, determining structural, genetic, and functional changes in the landscapes of the Aghdam district, and systematizing the transformed landscapes.

Methods: Satellite imagery, field research data, and archival materials were applied during the research procedure. A systematic approach was applied for the analysis, classifying, and assessing the scale of transformation of natural and anthropogenic landscapes.

Results: It was unraveled that the transformation of landscapes resulted from both direct and indirect impacts from military and technological activities. The classification of landscapes in the region revealed 2 main classes, 6 types, and 21 subtypes. The analysis identified a high degree of ecological degradation. Military actions exacerbated the degradation of natural components. Direct impacts included the destruction of forests, pastures, hydrological objects, and infrastructure, while indirect consequences have been experienced in the disturbance of natural balance and the deterioration of soil and water quality. An important aspect of the research is to identify functional changes in landscapes. The worsening environmental situation has led to a reduction in biodiversity, decreased water retention capacity, and an increased risk of soil erosion. In anthropogenic landscapes, there has been a complete loss of economic value in several areas, complicating the restoration process. The implemented classification provides the identification of major landscape groups based on the degree of transformation:

- Landscapes with minimal transformation (10% of the area), where changes are limited to local disturbances.
- Landscapes with moderate transformation (25%), are characterized by changes in vegetation structure and soil cover.
- Landscapes with high degrees of transformation (40%), where significant changes occur in ecosystems due to direct impacts.
- Landscapes with a complete loss of natural functions (25%), including areas that were destroyed by mines, infrastructure, and other military objects.

Conclusion: The research systematized landscape changes and revealed the scale of the consequences of military conflicts. The presented results enable the application of a landscape-oriented approach to monitoring and restoring territories, including the development of reclamation, demining, and ecological function restoration measures. The proposed classification of transformed landscapes can serve as a foundation for future research and the development of sustainable land management strategies.

Keywords: *military-technological impact, landscape, ecosystem, occupation, anthropogenic transformation, belligerent landscape, cultural landscape, pollution, landscape structure.*

In cites: Ismayilov Mirnuh, Kuchinskaya Irina, Karimova Elina (2025). Impact of military conflicts on landscape transformation (a case study for the Aghdam district of the Republic of Azerbaijan). *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (62), 194-204. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-15>

Introduction and research status. The recent increase in military conflict hotspots worldwide creates complex and long-term problems for the restoration of natural and anthropogenic ecosystems. Given the relevance of this issue for the future of humanity

and the preservation of the natural genetic fund, it is attempted to investigate the landscape-ecological features of the Karabakh region of Azerbaijan, which was under occupation for a long period and subjected to direct military-technological impact, using the ex-

ample of the Aghdam district.

The anthropogenic transformation of natural landscapes is a long and complex process. In the Aghdam district, human economic activity began in ancient times, and as a result of this, the anthropogenic load on landscapes steadily increased. As a result, initially, small anthropo-ecosystems gradually transformed into complex modern landscape complexes with elements of contemporary transformation [13, 19].

The purpose of the research work. The work aims to explore the trends in the development of modern landscapes, particularly anthropogenic landscapes, under the military-technological influence. The military-technological impact is a powerful ecological factor in the transformation of natural ecosystems.

Material and methods. In the course of the research, we applied the following methods: analysis of historical-genetic series, comparative method of natural analogs, and the landscape method based on field data and GIS technologies.

Research area. Aghdam district is an administrative-territorial unit in Azerbaijan, located in the western part of the country. It holds significant importance in the history and culture of the region, as well as strategic value.

The Aghdam district is situated on the Karabakh plain and borders the Khojavend, Tartar, Barda, Aghjabadi, and Fuzuli districts of the country. The area of the district covers approximately 1,150 square kilometers.

Aghdam district became one of the most affected regions as a result of the Armenian-Azerbaijani conflict, particularly during the First Karabakh War (1991–1994). The destruction led to the loss of historical heritage, the district's economic potential, and the forced displacement of more than 140,000 residents.

Since the early 1990s, as a result of the Karabakh conflict, a large part of the Aghdam district was occupied by Armenian forces. The city of Aghdam, the administrative center of the district, was almost destroyed, turning into a “ghost town.” Thousands of homes, public buildings, schools, hospitals, and infrastructure facilities were destroyed or rendered unusable. Until 2020, the ruins of Aghdam were primarily used for military positions and the illegal extraction of construction materials.

After the signing of the ceasefire agreement in 2020, the district was returned under Azerbaijan's control, and restoration work has begun.

The destruction of the Aghdam district was a tragedy not only for its residents but also for the entire country. After the conflict ended in 2020, the Aghdam district became one of the symbols of Azerbaijan's recovery. New residential neighborhoods, schools, hospitals, and infrastructure facilities are

being built. The restoration of the region is a priority project for the Azerbaijani government, focusing on the return of internally displaced persons to their native lands.

Result and discussion. The settlement of Somutepe, stretches back to the 2nd millennium BC, the burial mound of Sumurlu-tepe from the Bronze Age, the settlements of Goshatepe and Ilanlitepe from the Eneolithic period, and other historical and cultural monuments of the region are indicators that anthropogenic transformations in this area have ancient historical roots. The first anthropogenic transformations began in the forest-steppe landscapes of the low mountains and denudational-accumulative plains. The fact that these landscapes possess the necessary natural resource potential for human life created conditions for the expansion of residential areas and agricultural lands.

Arid forest ecosystems, which were one of the main structural elements of the forest-steppe landscape type, became the most affected by anthropogenic impact over time [4, 8]. Historically, the region was widely covered with arid forest ecosystems consisting of long-legged oak, wild pistachio (*Pistacia mutica*), and other tree and shrub species. Later, with the expansion of anthropogenic impact, these forests were cut down and turned into agricultural and pasture lands. Currently, these forests have survived only in a small area called the Sultanbud forest.

The creation of agro-industrial complexes during the intense development of agriculture has accelerated the anthropogenic impact on natural landscapes. Large areas, particularly within natural complexes of low mountains and partly sloping denudational-accumulative plains, turned into monocultural agroecosystems consisting of vineyards. This, in turn, further enhances the transformation and identification of biodiversity in the natural forest-steppe landscapes, which are characterized by rich landscape-ecological diversity.

During the nearly 30 years of occupation, the landscapes of the Aghdam district underwent a massive military-technological transformation. Virtually all the settlements under occupation, including the city of Aghdam, were completely destroyed and turned into ruinous landscapes. Destroyed roads, irrigation systems, numerous pits dug for military vehicles, military fortifications, trenches, and so on became the key components of belligerent landscapes (Fig. 1) [8, 10, 18].

Dry-steppe, xerophytic-shrubby, and semi-desert landscapes of the low mountain and sloping foothill plains of the region are secondary natural-anthropogenic formations that arose in place of former forests and forest-steppes.

The study of anthropogenic changes and landscape transformation was addressed by F.N. Milkov

[11], J.A.G. Jaeger [9], M.G. Nazarov [12], Nikolaishvili, et al [13], Denysyk, H., Kanskiy, V. et al [3] and others' works, who made valuable scientific and methodological conclusions during their research.

In Azerbaijan, studies have also been conducted on the anthropogenic transformation of modern landscape complexes and their classification. For exam-

ple, Y.A. Garibov [6] categorized anthropogenic landscapes in Azerbaijan by categories, subcategories, and variants.

M.A. Suleymanov [16], in his research, proposed a classification of anthropogenic landscapes based on natural landscapes, using class, type, subtype, and species as the classification units.



Fig. 1. Destroyed village of the Aghdam district

E.K. Alizade, M.J. Ismayilov, and others [1] categorized landscapes that underwent anthropogenic transformation based on changes in natural components. The degree of transformation of modern NTC (natural-territorial complexes) was used for grading: unchanged, slightly changed, moderately changed, strongly changed, and transformed.

In the naming of landscapes, more attention was paid to the main components of the natural complex. All anthropogenic changes are based primarily on the natural foundation of the landscape and can express it in specific ways.

Anthropogenic impacts manifest differently in the transformation of natural complexes. These impacts can be partially grouped as follows: agricultural activity, forestry, industrial-technological, population settlement, tourism and recreation, etc. The influence of this activity on landscape transformation is diverse as well. Despite covering small areas, construction works, and mining, culminate in the fundamental changes in landscapes, with almost all natural components undergoing complete transformation. While other sources of anthropogenic transformation do not directly affect the vertical structure of landscapes, they cover large areas and cause significant changes in the horizontal spatial structure of landscapes.

Analysis of the transformation characteristics of the landscapes in the Aghdam district revealed that there are virtually no landscapes that have not been transformed as a result of strong anthropogenic im-

pact. Other types of transformation are sufficiently represented in the local landscapes.

Considering the uniqueness of the landscape transformation in the Aghdam district, two classes of transformation were identified:

1. Landscapes with military-technological transformation;
2. Purposefully transformed cultural anthropogenic landscapes.

I. Landscapes with Military-Technological Transformation

It should be noted that military actions during the occupation, as a unique type of anthropogenic factor, played a significant role in the degradation of natural-landscape complexes in the Aghdam district and the disruption of the natural-ecological balance.

In the landscape structure of more than half of the district's territory, elements reflecting the nature of military actions can be found. These can briefly be called military-technological or belligerent landscapes. Military-technological landscapes in the region can be divided into two types based on their formation characteristics:

A. Military-technological landscapes formed under the direct influence of military actions; B. Military-technological landscapes transformed under the indirect influence of military actions;

1. Military-technological complexes include all complexes formed as a result of military actions and that underwent military-technological transformati-

ons. These include the following: combat trenches, road-communication complexes, military-technical structures, technological complexes involved in combat operations, defensive fortifications, battlefields, destroyed irrigation systems, destroyed residential complexes, craters formed by explosive ordnance, etc. [2] (Fig. 2).

2. Landscapes transformed under the indirect

influence of military actions: These include all complexes within the direct sphere of influence of military-technological complexes and those formed due to the indirect impact of military activities. This type also includes all occupied territories, which have numerous military barracks, secondary fortifications, dirt roads, military objects inside protected areas, etc. [5, 7, 20].



Fig. 2. Trench and defensive wall near the village of Tapgaragoyunlu (Aghdam district)

In the pre-occupation period, large vineyards, fertile grain fields, residential rural and urban landscapes surrounded by orchards, etc., existed in the places of military-technological complexes in the Aghdam district. That is, anthropogenic transformations were aimed at improving human life, and, to some extent, measures were taken to preserve the natural ecological balance. Along with the destruction of settlements, economic objects, and infrastructure during the occupation, military actions led to changes in the relief, destruction of soil and rock properties, deforestation, and the formation of belligerent landscapes such as barricades, trenches, and communication routes. During the occupation of Aghdam, more than 90,000 anti-personnel and anti-tank mines were placed. This is a source of danger to human life.

A completely different trend can be observed in the landscapes along the front line. In the frontline zone, natural landscapes were completely destroyed,

and more complex military complexes were constructed, affecting all ecosystems of the frontline landscapes. Characteristic features of the relief here include fortifications (trenches, ditches, firing points, etc.). On these territories, the upper layer of soil is contaminated with heavy metals and other chemical compounds and loses its fertility, and vegetation degrades. In the upper layer of the landscape in buffer zones, where intensive combat took place, from explosions, spills of petroleum products, etc., a layer was formed that poses a threat to human health and requires more than 10 years for decontamination [8].

During the occupation, in the direct military contact zone on the territory of the Aghdam district, more than 20 large fires were set during the plant vegetation period. As a result, thousands of hectares of land were affected by fires, causing enormous environmental damage. The results of these intentional fires were captured on satellite images [7, 17].

Starting from the war in 2020, when the territory was fully returned under Azerbaijan's control, the situation has begun to change. Enormous work is being done to clear the buffer zone, dismantle enemy fortifications, and so on. As a result, the territories that had been occupied for 30 years are now returning to economic circulation.

In the satellite images of the Aghdam district (2020–2023), which relate to the period of occupation (Fig. 3), horrifying images of military-technological transformation are clearly visible. Two-thirds of the district was occupied. On this territory, as a result of direct military vehicle influence, the relief of

natural and cultural landscapes was altered, the soil-vegetative cover degraded, and natural-territorial complexes (NTC) were transformed into belligerent landscapes [7, 14].

Based on the results of field studies (2022–2023) and the interpretation of high-resolution satellite images, a large-scale (1:100,000) digital map titled “Anthropogenic Transformation of Landscapes in the Aghdam District” (Fig. 4) was developed. Based on the analysis of the map, 2 classes and 21 types of landscapes were identified, which sharply differ from each other in terms of their types and structure of transformation.

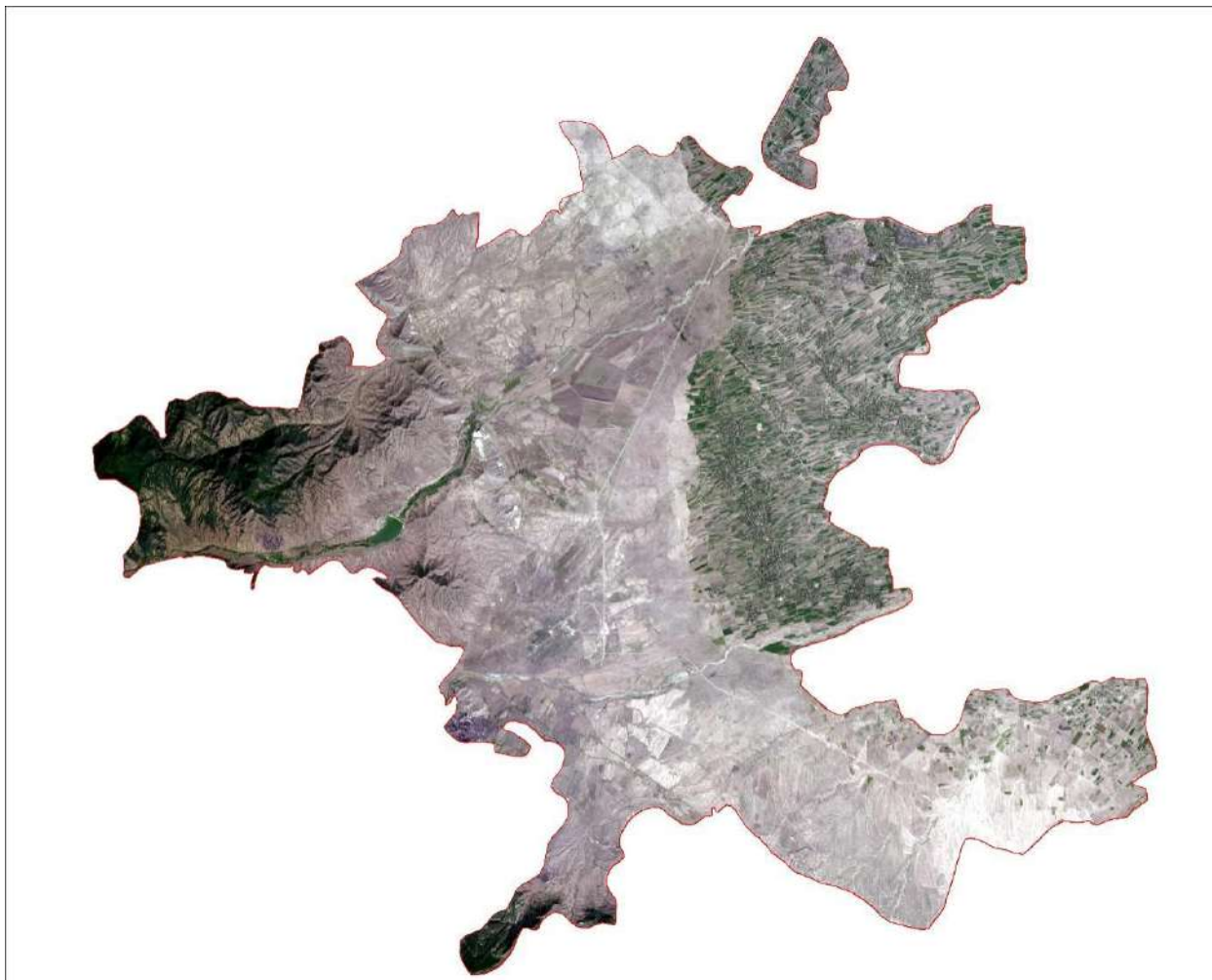


Fig. 3. Satellite Image of Anthropogenically Transformed Landscapes of the Aghdam District (2020)

In the class of military-transformed landscapes, 14 types of landscapes were distinguished according to the intensity of military-technical activities. Among them, the largest areas —7.7% and 7.5% of the total area are occupied by strongly disturbed and transformed military-technical forest-steppe landscapes and fundamentally altered and disturbed belligerent landscapes (table).

II. Deliberately transformed cultural anthropogenic landscapes.

The second class of transformed landscapes encompasses modern cultural landscapes that have been

deliberately altered in non-occupied areas. Within this class, 7 types of landscapes were distinguished (table). Of these, the largest area (8.5%) is occupied by urban and residential landscapes. The larger area of urban and residential landscapes in territories not subjected to occupation is related to the settlement of refugees from the occupied territories of the Karabakh region. According to the latest statistical data [15], the rural population density here is more than 300 people per km². This process increases the demographic load on modern landscapes.

In addition to this, the lower reaches of the Tartar

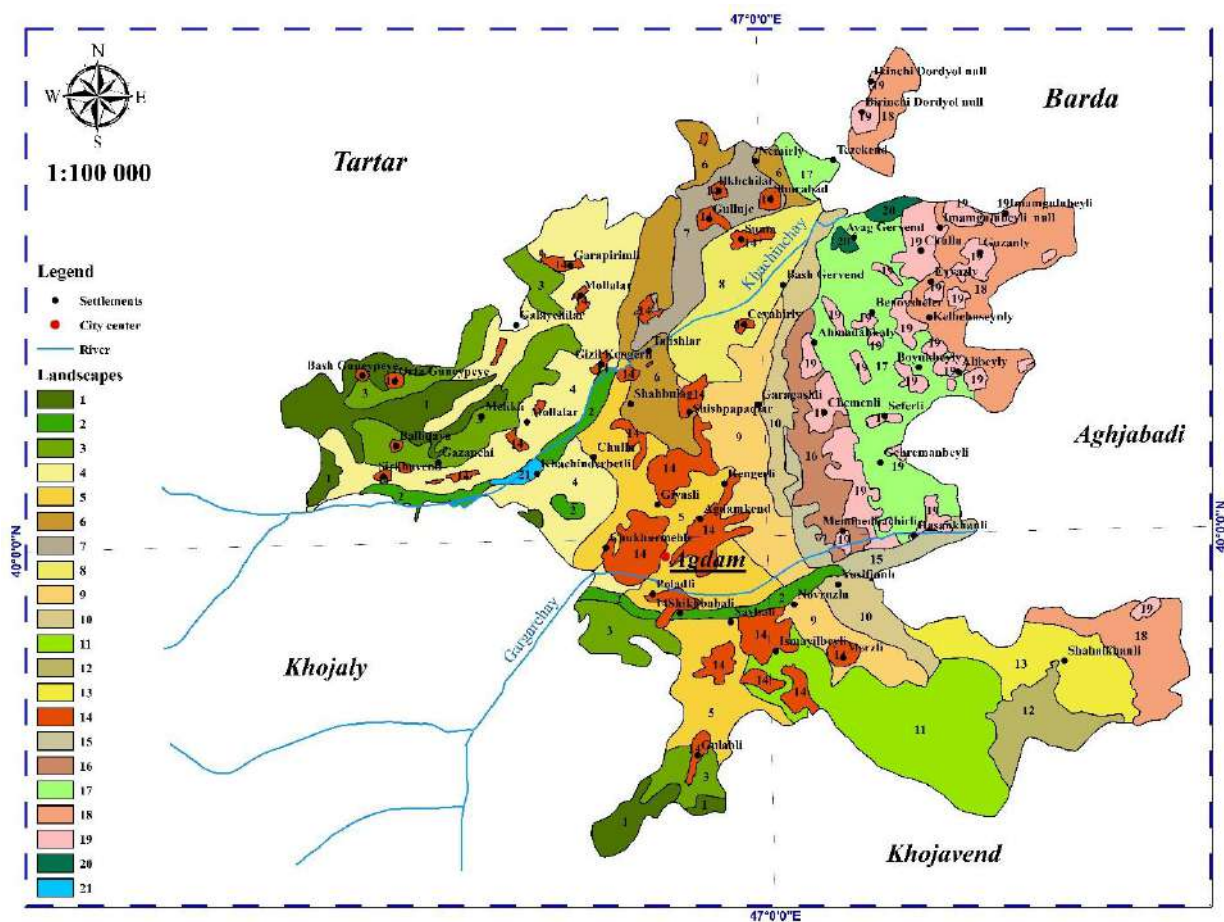


Fig. 4. Anthropogenic landscape transformation map of the Aghdam district.

Legend

I. Landscapes subjected to military-technical transformation:

1. Oak-hornbeam forests of the foothills, subjected to relatively weak transformation.
2. Weakly transformed shrub-grassland river valley landscapes.
3. Moderately transformed arid woodland and shrubland landscapes of the foothills.
4. Secondary dry steppe complexes of the foothills and intermountain depressions, heavily transformed due to fires and military equipment.
5. Strongly military-technically transformed xerophytic-shrubby steppes on the site of former vineyards on degraded gray-brown soils.
6. Strongly military-technically transformed xerophytic-shrubby steppe complexes of denudational-accumulative foothill plains.
7. Intensively transformed dry steppes of denudational-accumulative plains with fragments of military-technical changes.
8. Moderately transformed dry steppes of alluvial-accumulative plains on gray-brown soils with disrupted agroecosystems.
9. Radically transformed dry steppes on accumulative-denudational hill-belligerative badlands.
10. Strongly disturbed military-technical dry steppe complexes and radically transformed belligerative landscapes.
11. Forest-steppe complexes of accumulative-denudational plains, whose surface is heavily disturbed and transformed due to military-technical impacts and fires.
12. Badland belligerative landscapes of accumulative plains under the military-technical influence and fire impact.
13. Heavily disturbed and transformed dry steppe landscapes of moderately dissected plains due to fires and military-technical impacts.

II. Deliberately transformed cultural landscapes:

15. Moderately transformed pasture-mowing complexes on gray-brown soils of slightly sloped, hilly-rolling accumulative plains.
16. Semi-deserts, intensively transformed into plantation-garden complexes of accumulative plains on light gray-brown soils.
17. Intensively transformed agro-irrigation landscapes of accumulative plains.
18. Semi-deserts, consisting of strongly transformed cultural agro-irrigation complexes.
19. Settled rural and urban landscapes, consisting mostly of one- or two-story houses with gardens and crops.
20. Moderately transformed oak-pistachio arid forests on riverine hilly plains.
21. Reservoirs.

Main structural elements of anthropogenic transformation of landscapes in the Aghdam district

#	Landscape Type	Area (km ² /%)	Transformation Features	Degree of Transformation
1	Oak-hornbeam forests	59 (5.1%)	Ammunition depots, barracks	Relatively weakly transformed
2	Shrub-grassland	28 (2.4%)	Barracks, militarized roads, communication lines	Weakly transformed
3	Forest and shrubland	79 (6.9%)	Military vehicle shelters, barracks	Moderately transformed
4	Dry steppes	19 (1.7%)	Impact of military equipment	Strongly transformed
5	Xerophytic-shrubby steppes	94 (8.2%)	Impact of military equipment	Strongly transformed
6	Xerophytic-shrubby steppes	54 (4.7%)	Impact of military equipment	Strongly transformed
7	Dry steppes	36 (3.1%)	Military bunkers, trenches for personnel, and military equipment	Strongly transformed
8	Dry steppes	55 (4.8%)	Agroecosystems (for military grain and vegetable crops)	Moderately transformed
9	Dry steppes	74 (6.4%)	Land destroyed by fires, military equipment, etc.	Radically transformed
10	Dry steppes	44 (3.8%)	Antitank ditches, trenches, etc.	Strongly disturbed and transformed
11	Forest-steppe landscapes	88 (7.7%)	Fires and military-technical actions	Strongly disturbed and transformed
12	Belligerent landscapes	86 (7.5%)	Fires and military-technical actions	Radically transformed
13	Dry steppes	48 (4.2%)	Fires and military-technical actions	Strongly disturbed and transformed
14	Urban and residential landscapes	27 (2.8%)	Destroyed houses, roads, administrative buildings, etc.	Radically transformed
15	Pasture-mowing complexes	26 (2.3%)	Irrigated feed crop plantations, etc.	Moderately transformed
16	Semi-desert landscapes	37 (3.2%)	Irrigated fields, orchards, etc.	Intensively transformed
17	Agro-irrigated landscapes	78 (6.8%)	Intensively irrigated fields	Intensively transformed
18	Agro-irrigated landscapes and semi-deserts	7 (0.6%)	Intensively irrigated crops, orchards, etc.	Strongly transformed
19	Settled rural and urban landscapes	98 (8.5%)	One- or two-story houses, cultivated suburban plots	Radically transformed
20	Arid forests	104 (9%)	Logging, tree damage, grazing, etc.	Moderately transformed
21	Reservoirs	4 (0.3%)	Water catchment	Radically transformed

and Khachinchay Rivers flowing through the district were dried up during the occupation, which gave rise to the water scarcity for irrigation in the Karabakh plain. (Fig. 5).

This situation negatively affects the development of agriculture in the area. As a result, the local population has increased the consumption of groundwater. Excessive use of groundwater has lowered the groundwater level, which, in turn, has transformed the surrounding landscapes into a more desertified state.

An analysis of the degree of anthropogenic transformation of the spatial structure of landscapes indicates that 34% of landscapes are subject to strong anthropogenic transformation, 25.5% to radical transformation, 23% to moderate transformation, 10% to intensive transformation, and 7.5% to weak transformation (Fig. 6).

- In the weakly transformed landscapes, even if degradation of certain components (such as flora and fauna) is observed under anthropogenic influence, their restoration is possible.



Fig. 5. The dried-up riverbed of the Tartar River

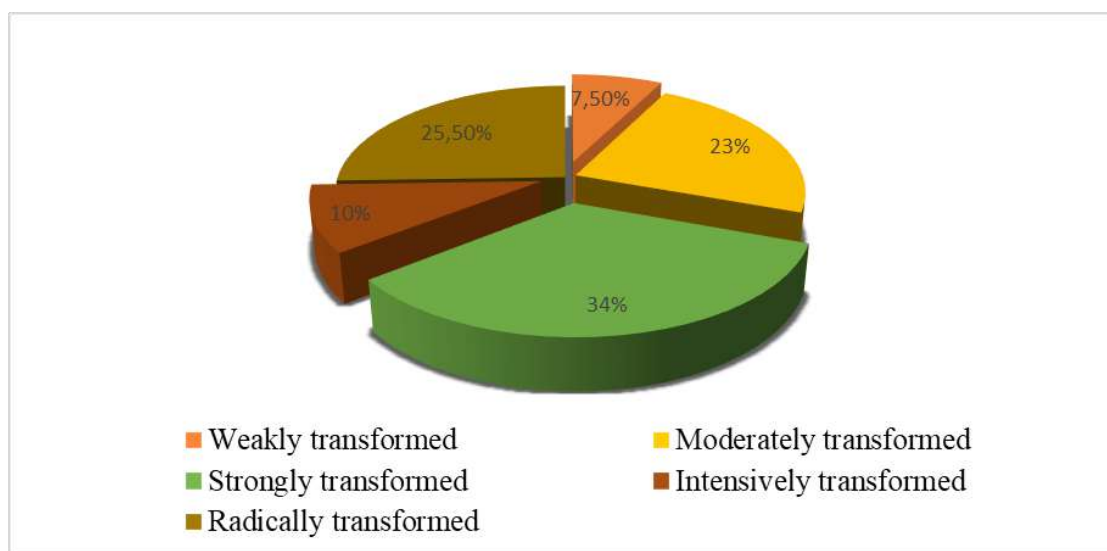


Fig. 6. The degree of anthropogenic transformation of the spatial structure of landscapes

- In landscapes subject to moderate transformation, soil cover disturbances caused by military-technical impacts have already been observed.
- In strongly transformed landscapes, along with changes in relief, alterations in the flow of surface waters also occur.
- In landscapes subject to intensive transformation, their main components are continuously affected by military-technical and human activities.
- Landscapes subject to radical transformation include destroyed settlements and urban complexes, fortified defense structures, and so on.

Conclusions. For the first time, based on satellite images and field research, the transformed

natural-anthropogenic landscapes in the studied area, which changed as a result of military-technical activities, were categorized into 2 classes, 6 types, and 21 species according to their structural-genetic and functional characteristics.

Using the selected criteria, landscapes subject to military-technical transformation were mapped according to their degree of transformation: weakly, moderately, strongly, intensively, and radically. The analysis of the digital map revealed that 34% of the natural landscapes in the studied area are subject to strong military-technical transformation, 25.5% to radical transformation, 23% to moderate transformation, 10% to intensive transformation, and 7.5% to weak transformation.

Bibliography

1. Əlizadə, E.K., İsmayilov, M.C. və b. (2014). *Azərbaycanın landşaftları*. "Azərbaycan Respublikasının coğrafiyası. Fiziki coğrafiya", Monoqrafiya. Bakı: "Avropa" nəşriyyatı, I, sah. 374-440.

2. Байрак, Г. (2020). Сучасний бelligеративний рельєф (на прикладі Яворівського військового полігону Львівщини). *Проблеми геоморфології і палеогеографії українських Карпат і прилеглих територій*, 11(1), 208-229. DOI: <http://dx.doi.org/10.30970/gpc.2020.1.3209>
3. Denysyk, H., Kanskyi, V., Kanska, V., Denysyk, B. et al. (2022). Anthropogenic landscapes of Ukraine and their reconstruction. *Czasopismo Geograficzne*, 93(3), 417-433 DOI: <https://doi.org/10.12657/czageo-93-16>
4. Ellis, E.C., Goldewijk, K.K., Siebert, S. et al. (2010). Anthropogenic Transformation of the Biomes, 1700 to 2000. *Global Ecology and Biogeography* 19(5), 589-606 DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00540.x>
5. Filho, W.L., Fedoruk, M., Eustachio, J.H.P., Splodytel, A. et al. (2024). The environment as the first victim: The impacts of the war on the preservation areas in Ukraine. *Journal of Environmental Management*, 364(12), 121399, 1-10 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121399>
6. Qəribov, Y.Ə. (2013). *Azərbaycan Respublikasının müasir landşaftlarının antropogen transformasiyası və onların optimallaşdırılması yolları: c.ü.e.d. elmi dərəcə almaq üçün dissert. ...avtoref.* Bakı, 56.
7. Гулиева, С.Ю., Кучинская, И.Я., Керимова, Э.Д. (2013). Трансформация ландшафтных комплексов в районах вооруженных конфликтов (на примере юго-восточного склона Малого Кавказа). *Мат-лы междунар. науч.-практич. конф. «VII Жандаевские чтения»*, Алматы, 343–348.
8. Ismayilov, M.J., Zeynalova, S.M. (2022). Environmental disaster and ecological destruction in Karabakh during the Armenian occupation. *Ancient Homeland Karabakh, to the martyrs and veterans of the Karabakh war*: Divan Kitab. Ankara, 252-272.
9. Jaeger J.A.G. (2000). Landscape division, splitting index and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation. *Landscape ecology*, 15: 115-130 DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1008129329289>
10. Kuchinskaya, I.Y., Karimova, E.J. (2022). Belligerative landscapes of the eastern part of the Lesser Caucasus and features of their restoration. *II International scientific conference "Landscape dimensions of sustainable development Science - CartiGis-Planning-Givernance"*, Tbilisi, 153-155.
11. Мильков Ф.Н. (1978). *Руководные ландшафты*. Мысль, 86.
12. Nazarov M.G. (2023). The variety of anthropogenic landscape and the scientific theoretical basis of their classification. *American journal of Interdisciplinary Research and Development*, 14:127-132. Retrieved from <https://www.ajird.journalspark.org/index.php/ajird/article/view/570>
13. Николаишвили, Д.А., Шарашенидзе, М.Д., Толордава, Р.Ш. и др. (2020). Антропогенное изменение ландшафтов Грузии в XIX-XX веках. *InterCarto InterGIS* 26(4): 385-392. DOI: <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2020-4-26-385-392>
14. Пересадыко, В., Сержантова, Ю., Борисенко, К., Браславська, О. (2023). Особливості картографічної візуалізації стану ландшафтів у період воєнних дій. *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії*, 38, 32-39. DOI: <https://doi.org/10.26565/2075-1893-2023-38-04>
15. *Azərbaycanın rayonları* (2022). *Statistika məlumatları*. Bakı, 237-247.
16. Süleymanov, M.Ə. (2005). *Azərbaycanın təbii və antropogen landşaftlarının coğrafi qanunauyğunluqları*. Bakı, 248 səh.
17. Тарихазер, С.А. (2022). Эколого-геоморфологические последствия военной агрессии на территории Карабаха. *Coğrafiya və təbii sərvətlər*, 1(16), 57-65.
18. Воробйов, В.В., Шило, О.С. (2023). Післявоєнна відбудова міст України в ареалах розповсюдження бelligеративних ландшафтів. *Український журнал будівництва та архітектури*, 3(015), 40-49. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.140723.40.953>
19. Юнусов, М.И., Кучинская, И.Я., Керимова, Э.Д. (2024). Антропогенная трансформация ландшафтов юго-восточной части Малого Кавказа. *Мат-лы I Белорусского географического конгресса*, М-к, 8–13 апр. Ч. 5. Актуальные проблемы геоэкологии и ландшафтоведения. М-к: БГУ, 341-349.
20. Pereira, P., Bašić, F., Bogunovic, I., Barcelo, D. (2022). Russian-Ukrainian war impacts the total environment. *Science of The Total Environment*, 837, 155865, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155865>

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

References

1. Alizade, E.K., Ismayilov, M.J. et al. (2014). *Landscapes of Azerbaijan. Monograph "Physical Geography of Azerbaijan"*. Baku, I, 374-440. [in Azerbaijani].
2. Bayrak G. (2020). Modern belligerative relief (on the example of Yavoriv military training ground of Lviv region). *Problems of geomorphology and paleogeography of the Ukrainian Carpathians and adjacent areas*, 11(1), 208-229 DOI: <http://dx.doi.org/10.30970/gpc.2020.1.3209> [in Ukrainian].
3. Denysyk, H., Kanskyi, V., Kanska, V., Denysyk, B. et al. (2022). Anthropogenic landscapes of Ukraine and their reconstruction. *Czasopismo Geograficzne*, 93(3), 417-433. DOI: <https://doi.org/10.12657/czageo-93-16>
4. Ellis, E.C., Goldewijk, K.K., Siebert, S. et al. (2010). Anthropogenic Transformation of the Biomes, 1700 to 2000. *Global Ecology and Biogeography* 19(5), 589-606. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00540.x>

5. Filho, W.L., Fedoruk, M., Eustachio, J.H.P., Splodytel, A. et al. (2024). The environment as the first victim: The impacts of the war on the preservation areas in Ukraine. *Journal of Environmental Management*, 364(12), 121399, 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121399>
6. Garibov, Y.A. (2013). *Anthropogenic transformation and ways to optimize modern landscapes of the Republic of Azerbaijan: PhD thesis abstract...Doctor of Geography*. Baku, 36 [in Azerbaijani].
7. Guliyeva, S.Yu., Kuchinskaya, I.Ya., Karimova E.J. (2013). Transformation of landscape complexes in areas of armed conflicts (on the example of the southeastern slope of the Small Caucasus). *Materials of the International scientific-practical conference "VII Zhandaev Readings"*, Almaty, 343-348.
8. Ismayilov, M.J., Zeynalova, S.M. (2022). Environmental disaster and ecological destruction in Karabakh during the Armenian occupation. *Ancient Homeland Karabakh, to the martyrs and veterans of the Karabakh war*. Divan Kitab. Ankara, 252-272.
9. Jaeger J.A.G. (2000). Landscape division, splitting index and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation. *Landscape ecology*, 15: 115-130. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1008129329289>
10. Kuchinskaya, I.Y., Karimova, E.J. (2022). Belligerent landscapes of the eastern part of the Lesser Caucasus and features of their restoration. II International scientific conference "Landscape dimensions of sustainable development Science - CartiGis-Planning-Governance", Tbilisi, 153-155.
11. Milkov, F.N. (1978). *Artificial landscapes*. M.: Mysl, 86.
12. Nazarov M.G. (2023). The variety of anthropogenic landscape and the scientific theoretical basis of their classification. *American journal of Interdisciplinary Research and Development*, 14:127-132. Retrieved from <https://www.ajird.journalspark.org/index.php/ajird/article/view/570>
13. Nikolaishvili, D.A., Sharashenidze, M.D., Tolordava, R.Sh. et al. (2020). Anthropogenic transformation of landscapes in 19th–20th centuries. *InterCarto InterGIS* 26(4):385-392. DOI: <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2020-4-26-385-392>
14. Peresadko, V.A., Serzhantova, Y.Y., Borysenko, K.B., Braslavskaya, O.V. (2023). Features of cartographic visualization of the state of landscapes during the period of hostilities. *Problems of continuous geographical education and cartography*, 38, 32-39. DOI: <https://doi.org/10.26565/2075-1893-2023-38-04> [in Ukrainian]
15. *Regions of Azerbaijan*. (2022). *Statistical Yearbook*. Baku, 237-247 [in Azerbaijani].
16. Suleymanov, M.A. (2005). *Geographical regularities of natural and anthropogenic landscapes of Azerbaijan*. Baku: Abilov Publishing, 248 [in Azerbaijani].
17. Tarikhazer, S.A. (2022). Ecogeomorphological consequences of military aggression on the territory of Karabakh. *Geography and Natural Resources*, 1(16), 57-65.
18. Vorobiov, V.V., Shylo, O.S. (2023). Post-war reconstruction of cities in Ukraine in areas of the belligerent landscapes' spread. *Ukrainian journal of civil engineering and architecture*, 3(015), 40-49. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.140723.40.953> [in Ukrainian]
19. Yunusov, M.I., Kuchinskaya, I.Y., Karimova, E.J. (2024). Anthropogenic transformation of landscapes in the south-eastern part of the Lesser Caucasus. *Materials of the I Belarusian Geographical Congress, Minsk, April 8–13, 5*, 341-349.
20. Pereira, P., Bašić, F., Bogunovic, I., Barcelo, D. (2022). Russian-Ukrainian war impacts the total environment. *Science of The Total Environment*, 837, 155865, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155865>

Вплив військових конфліктів на трансформацію ландшафту (на прикладі Агдамського району Азербайджанської Республіки)

Мирнук Ісмаїлов¹

к. геогр. н., доцент, зав. відділу ландшафтознавства
та ландшафтного планування,

¹ Інституту географії Міністерства науки і освіти
Азербайджанської Республіки, Баку, Азербайджан;

Ірина Кучинська¹

к. геогр. н., доцент, пров. наук. співробітник
відділу ландшафтознавства та ландшафтного планування;

Еліна Карімова¹

к. геогр. н., доцент, пров. наук. співробітник
відділу ландшафтознавства та ландшафтного планування

У статті досліджується вплив наслідків бойових дій на ландшафтну структуру та екологічний стан Агдамського району Азербайджану. Його територія перебувала під окупацією близько 30 років, вона зазнала значних руйнувань, що призвело до екологічних, соціальних та економічних втрат. Протягом 30 років Агдамський район був буферною зоною між конфліктуючими сторонами. Оскільки в орографічному плані більша частина його території являє собою рівнину з незначними перепадами висот, під час бойових операцій обидві сторони активно

використовували міни - як протипіхотні, так і протитанкові - для оборони стратегічних позицій, захисту тилу, зміцнення ліній фронту. За попередніми оцінками, збиток природним і антропогенним екосистемам перевищив 200 мільярдів доларів. В Агдамському районі повністю знищено понад 50 пам'яток природи, а також інфраструктуру 58 сільських населених пунктів і однієї міської території. Крім того, понад 90 000 наземних мін становлять постійну загрозу для місцевого населення, перешкоджаючи зусиллям з відновлення. В статті проведено дослідження впливу військово-технічної діяльності на трансформацію ландшафту в Агдамському регіоні, визначено основні структурно-генетичні та функціональні зміни, систематизовано трансформовані ландшафти. У дослідженні використовувався аналіз супутникових знімків, польові дослідження та архівні дані. Застосовано системний підхід до вивчення структурно-генетичних та функціональних змін природних і антропогенних ландшафтів. Встановлено, що трансформація ландшафту відбулася як внаслідок прямого, так і опосередкованого впливу військово-технічної діяльності. Природно-антропогенні ландшафти області класифіковано на два класи, шість типів і 21 підтип. В ході дослідження виявлено високий ступінь деградації навколишнього середовища, що призводить до значних змін у структурі, функціях і стані екосистем. Проведені дослідження дають оцінку наслідків військово-технічних впливів на ландшафти регіону. Результати можуть стати основою для подальших досліджень з моніторингу та оцінки екологічних змін, викликаних військовими конфліктами, а також для розробки підходів до відновлення території.

Ключові слова: *військово-технічний вплив, ландшафт, екосистема, окупація, антропогенна трансформація, бelligеративний ландшафт, культурний ландшафт, забруднення, ландшафтна структура.*

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Надійшла 31 січня 2025 р.

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Прийнята 8 квітня 2025 р.

Технологія геоінформаційного оцінювання та картографування ефективності міських зелених зон у зниженні рівня автомагістрального шуму

Наталія Корогода¹

к. геогр. н., доцент, кафедра географії України,

¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна,

e-mail: nkorogoda@knu.ua,  <https://orcid.org/0000-0003-1518-2997>;

Тетяна Купач¹

к. геогр. н., доцент, кафедра географії України,

e-mail: tkupach@knu.ua,  <https://orcid.org/0000-0001-8710-7107>

Шум є одним з чинників формування якості життя в містах. Автошляхи відіграють домінуючу роль в утворенні міського шуму. Захист населення міста від автомагістрального шуму - одна з провідних функцій, яку виконують міські зелені зони (МЗЗ). Проведення оцінки ефективності МЗЗ є необхідним, оскільки дозволяє визначити ті з них, які потребують першочергових управлінських рішень для забезпечення їх оптимального функціонування та найбільш ефективного виконання функції шумозниження. Наразі бракує технологій, за якими легко визначити ефективність МЗЗ. Відповідно, метою роботи є представлення технології геоінформаційного оцінювання ефективності МЗЗ у зниженні рівня автомагістрального шуму та картографування результатів оцінки. Технологія являє собою сукупність процедур підготовки та опрацювання геоданих для оцінювання ефективності МЗЗ у шумозниженні відповідно до методики. Процедури складаються в алгоритмічні ланцюги, графічно об'єднані у автоматизовану модель обчислення Model_NOISE в середовищі Model Designer QGIS. Складовими технології є загальний алгоритм проведення оцінки; автоматизована модель обчислення; база геоданих. Технологія передбачає включення в оцінку всіх аспектів, що обумовлюють ефективність МЗЗ і тому містить процедури геообробки попереднього підготовки вхідних даних. Робочий процес оцінки в Model_NOISE включає наступні підпроцеси: 1. визначення характеристик зеленої зони та її актуального стану; 2. обчислення первинного поля шумового забруднення від автошляхів; 3. визначення «залишкового» рівню шуму в зеленій зоні та її ефективності. В роботі наведені результати картографічної візуалізації оцінки ефективності МЗЗ міста Києва. Технологія є придатною для обробки просторово-розподіленої, часто обмеженої інформації, що робить її ефективним інструментом у практиці міського планування та прийняття рішень при розробці проєктів озеленення міст.

Ключові слова: міські зелені зони (МЗЗ), технологія, оцінка ефективності МЗЗ, автомагістральний шум, база геоданих, автоматизовані моделі обчислення.

Як цитувати: Корогода Наталія, Купач Тетяна (2025). Технологія геоінформаційного оцінювання та картографування ефективності міських зелених зон у зниженні рівня автомагістрального шуму. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (62), 205-218. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-16>

In cites: Korohoda Nataliia, Kupach Tetiana (2025). Technology for geoinformation assessment and mapping of the effectiveness of urban green spaces in motorway noise reducing. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (62), 205-218. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-16> [in Ukrainian]

Постановка проблеми. Шум є одним з чинників формування якості життя в містах, що за останні роки зріс майже на 25 % [12]. Його надмірний рівень може стати причиною нервового виснаження, швидкої стомлюваності, ослаблення пам'яті, уваги тощо [13, 18, 23, 25]. Автошляхи відіграють домінуючу роль у формуванні шуму в місті, адже частка, яку складає транспортний шум сягає 60-80%. При цьому, автомагістралі створюють найвищі ризики, оскільки понад 80% шумового навантаження на територіях житлової забудови міст виникає саме через автомобільний транспорт [10 -12, 18, 29].

Захист міського населення від автомагістрального шуму, одна з провідних функцій, яку виконують міські зелені зони (МЗЗ), оскільки рослини знижують рівні шуму саме на частотах, що продукуються дорожнім рухом [12, 28]. Ослаблення звукових хвиль у момент їх проходження крізь гілки, листя або хвою відбувається переважно за

рахунок відбивання, поглинання і трансформації [1, 3]. Проте не всі МЗЗ мають «рівну» ефективність у виконанні даної функції, адже рослинність у них має різну площу поверхні контакту зі звуковими хвилями. Відповідно, проведення оцінки ефективності є необхідним для забезпечення найбільш комфортних умов проживання в місті, оскільки дозволяє визначити ті МЗЗ, які потребують першочергових управлінських рішень для забезпечення їх оптимального функціонування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Роботи, присвячені оцінюванню шумозахисних властивостей МЗЗ наразі представлені досить широко [17, 18, 24, 30]. В частині робіт наводяться результати натурних спостережень, направлених на оцінку взаємозв'язку між параметрами рослинності (наприклад, біофізичними) та рівнем зниження шуму [20, 28]. Інші дослідження ґрунтуються на емпіричних моделях. Зокрема у роботі [26] було застосовано моделювання в оцінці

впливу окремих елементів на шумозниження в міських парках.

Також активно використовується геоінформаційне моделювання. Наприклад, у [14] було проведено картографування перерозподілу шуму за допомогою ГІС. Наразі існує низка програмних продуктів, що дозволяють розрахувати та оцінити рівні шуму, зокрема, пов'язані з дорожнім рухом. Наприклад, NoiseModelling є інтегрованим додатком в ГІС, що дозволяє оцінити вплив різних сценаріїв, пов'язаних з дорожнім рухом на населення [31]. Самостійне програмне забезпечення CadnaA дозволяє не лише розрахувати рівні шуму, а й спрогнозувати їхні зміни для керування впливом від різноманітних джерел звуку, таких як промислові об'єкти, автомагістралі, залізниці тощо [32]. Більшість програмних продуктів зосереджуються саме на моделюванні процесу розподілу шуму, однак в них не використовуються характеристики зелених насаджень в процесах розподілу шуму. У роботах [5, 8, 9] було запропоновано методику оцінки екосистемних послуг зі зниження рівня шуму від дорожнього руху в місті, що спирається як на властивості МЗЗ, так і рівні автотранспортного навантаження. За методикою розрахунки мають проводитись відповідно до алгоритму, що полягає у послідовному виконанні наступних завдань: 1. встановити первинне поле шумового забруднення від автошляхів з різною інтенсивністю транспортного потоку; 2. визначити ефективність виконання функції по зниженню шумового забруднення від автошляхів, що виконують зелені зони залежно від їх актуального стану.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Не зважаючи на наявний методологічний апарат, на сьогодні бракує робіт, що розкривають технологію реалізації процесу оцінки. Така технологія має бути простою у використанні - за якою легко визначати стан зелених зон та ефективність їх функціонування. Технологія має бути доступною не лише для науковців, а й для практиків містопланування. Для цього дані, що використовуються мають бути відкриті, а власне технологія має бути придатною для обробки просторово-розподіленої, часто обмеженої інформації.

Формулювання мети статті. Звідси, метою даної роботи є представлення технології геоінформаційного оцінювання ефективності МЗЗ у зниженні рівня автомагістрального шуму. Відповідно до загальноприйнятого визначення, «геоінформаційні технології» являють собою сукупність методів, інструментарію та програмного забезпечення для роботи з геоданими. Тож, запропонована нами розробка, є технологією геоінформаційного оцінювання через наявність у ній сукупності методичних прийомів оцінювання ефективності та

технологічних рішень їх реалізації із використанням можливостей ГІС. Технологія являє собою сукупність процедур підготовки та опрацювання геоданих для кількісного оцінювання ефективності МЗЗ у шумозниженні відповідно до методики. Процедури складаються в алгоритмічні ланцюги, графічно об'єднані у автоматизовану модель обчислення в середовищі Model Designer QGIS для створення єдиного робочого процесу оцінки ефективності МЗЗ. Складовими технології є загальний алгоритм проведення оцінки; автоматизована модель обчислення; база геоданих. Всі технологічні рішення базуються на використанні: а) вільного програмного забезпечення ГІС QGIS відповідно до ліцензії GNU GPL; б) відкритих просторових даних про МЗЗ. Технологія передбачає включення в оцінку геоданих, що обумовлюють ефективність МЗЗ і тому містить процедури попередньої геообробки вхідних даних. Технологія є корисною для вирішення містобудівних задач, оскільки дозволяє отримати актуальну просторову інформацію про стан та ефективність МЗЗ у шумозниженні. Дана інформація є основою для прийняття управлінських рішень по підвищенню ефективності тих МЗЗ, що цього потребують при розробці проектів озеленення міст, управлінні міськими зеленими просторами та впровадженні просторових / ландшафтних планів розвитку територій об'єднаних громад тощо.

Виклад основного матеріалу дослідження. Особливості технології геоінформаційного оцінювання полягають у послідовному виконанні методичних кроків [8, 6], інструментами просторового аналізу QGIS/SAGA, що містять необхідні алгоритми геообробки даних та модулі для їх обчислення. Всі процедури виконання оцінювання автоматизовано за допомогою середовища геообробки QGIS Model Designer і представлено у вигляді моделі Model_NOISE. Точність обчислення моделлю залежить від повноти вхідної інформації та якості її підготовки при введенні у процедури обчислення.

Тож, для коректної роботи Model_NOISE важливими є вхідні дані: набір просторових даних векторної геометрії «Vegetation» (.shp) та набір просторових даних векторної геометрії «BGI» (.shp), атрибути яких на вході моделі повинні відповідати вимогам, представленим у [7]. Набір просторових даних векторної геометрії «Roads» (.shp), атрибути якого повинні відповідати вимогам, представленим у табл. 1.

В цілому алгоритмічна схема обчислень в Model_NOISE включає декілька підпроцесів:

I. Підпроцес визначення характеристик зеленої зони та її актуального стану, які визначають її ефективність в шумозахисті. Серед характеристик таких характеристик нами враховано тип рос-

Таблиця 1 / Table 1

Атрибути вхідного набору геоданих «Roads» / The attributes of the input geodata set 'Roads'

Атрибут	Тип даних	Зміст атрибуту	Код	Зміст коду
osm_id	VARCHAR(10) (String 12)	Ідентифікатор який отримано з [21] (way_id)*.		Код автошляху
*У випадку, якщо декілька об'єктів у OSM об'єднано в один об'єкт, це буде один з ідентифікаторів. Цей ідентифікатор не обов'язково є унікальним, оскільки один об'єкт OSM може призвести до створення декількох об'єктів геометрії.				
code	SMALLINT (2 Bytes)	4-значний код [21]	від 1000 до 9999	Клас ознак об'єктів: перша одна або перші одна/дві цифри визначають шар, останні дві/три цифри - клас всередині шару
fclass	VARCHAR(40) (String 28)	Категорія автошляху [21]	Residential	Малі дороги, дороги в житлових районах
			Unclassified	Малі дороги, не класифіковані малі місцеві дороги
			Tertiary	Основні дороги, як правило, місцевого значення
			Primary	Основні дороги, первинні дороги, як правило, національні
			Primary_link	З'єднання на автомобільних дорогах доріг (естакади/пандуси)
			Secondary	Основні дороги, другорядні дороги, як правило, регіональні
			Trunk	Основні дороги, дороги магістральні, важливі дороги, як правило, розділені
			Trunk_link	З'єднання на магістральних дорогах (естакади/пандуси)
			Motorway	Основні дороги, автомагістраль/автострада
maxspeed	Integer 64(10)	Максимальна дозволена швидкість, км/год		
flow_speed	Integer 64(10)	Швидкість потоку, км/год	39	Житлові вулиці (зовнішньо-квартальні) з кількістю авто/година 500-1000
			45	Магістральні вулиці та дороги: - районного значення дороги загальноміського та районного значення регульованого руху з кількістю авто/година 1000-2000
			55	Магістральні вулиці та дороги загальноміського та районного значення безперервного руху з кількістю авто/година понад 2000
typ_cod	Integer 64(10)	Категорія автошляху характерна для населених пунктів України	2	Житлові вулиці (зовнішньо-квартальні)
			3	Магістральні вулиці та дороги: - районного значення дороги загальноміського та районного значення регульованого руху
			4	Магістральні вулиці та дороги загальноміського та районного значення безперервного руху

линності та дендрологічний склад посадки, оскільки вони й визначають частку шуму, що поглинається. Відповідно до них в методиці оцінювання [8] запропоновано використовувати коефіцієнт зниження рівня шуму – параметр *I_noise_reduction*. Значення даного коефіцієнта зведено у таблиці 2.

II. Підпроцес обчислення первинного поля

шумового забруднення від автошляхів з різною інтенсивністю транспортного потоку. В даному підпроцесі за розрахункові показники прийнято потужність джерела емісії (табл. 3), властивості самої зеленої зони, відстань від джерела шуму тощо. Зокрема останнє враховується, адже за [15] зниження шуму досягає 0,5 дБ для відстані 100 м, навіть при відсутності шумопоглинальних екранів.

Таблиця 2 / Table 2

Коефіцієнт зниження рівня шуму, обумовлений характеристиками рослинного покриття –
I_noise_reduction / Noise reduction coefficient due to vegetation features – *I_noise_reduction*

Тип насаджень (Usage_type)	<i>I_noise_reduction_i</i>			
Ширина (м)	10	20	50	100
Смуга (листяна деревна рослинність)	0,955	0,92	0,89	
Лісопарк (листяна деревна рослинність)	0,85	0,78	0,72	0,66
Лісопарк (хвойна деревна рослинність)	0,79	0,72	0,68	0,6
Парк	0,9	0,81	0,75	0,72
Інші типи насаджень (вуличні насадження сельбищної зони)	0,94	0,88	0,86	0,75
Газон	0,95	0,89	0,87	0,78

Таблиця 3 / Table 3

Середні рівні шуму (*Power_emission*) відповідно до категорії доріг, як показник потужності джерела емісії / Average noise levels (*Power_emission*) according to the road category as an indicator of the power of the emission source

Категорія	Класи доріг у БД OSM	Кількість авто/год	<i>Power_emission</i> діапазон (середні значення)
Житлові вулиці (зовнішньоквартальні)	Residential; Unclassified; Tertiary	500-1000	70-72 (71)
Магістральні вулиці та дороги районного значення	Secondary; Trunk_link; Primary_link	1000-1600	73-80 (76,5)
Магістральні вулиці та дороги загальноміського та районного значення регульованого руху	Primary	1600-2000	77-83 (80)
Магістральні вулиці та дороги загальноміського та районного значення безперервного руху	Trunk; Motorway	Більше 2000	80-85 (82,5)

III. Підпроцес визначення «залишкового» рівня шуму та ефективності зеленої зони у зниженні рівня шуму.

Реалізація I підпроцесу здійснюється шляхом:

1. створення вибірок для обчислень за запитом до атрибутивних таблиць за алгоритмами геообробки Vector selection / module Select by expression та оверлейного аналізу Vector overlay /

module Intersection між наборами геоданих «BGI» та «Vegetation».

2. Векторних обчислень та отримання «комплексного» типу зелених зон, відповідно до характеру використання (див. табл. 2) з вхідного шару «BGI» та типу насаджень з вхідного шару «Vegetation» з використанням процедур Vector Table / module Field calculator. Процедур оптимізовано складним запитом (табл. 4).

Таблиця 4 / Table 4

Фрагмент процедури запиту для створення атрибуту комплексного типу зеленої зони /
A part of query for creating the values of a complex green area type

```
CASE
WHEN ("type_BGI_noise" = 1 ) AND ("type_V_noise" = 1) THEN 1
...
WHEN ( "type_BGI_noise" = 1) AND ( "type_V_noise" = 3) THEN 5
END
```

3. Геометричних обчислень «oriented rectangle», що охоплюють об'єкти з вхідного шару, процедурами Vector Geometry / module Minimum bounding geometry. Елементи оновленої геометрії групуються за полем унікального ідентифікатору «F_num_id» зелених зон, що створюється для визначення коефіцієнта зниження рівня

шуму *I_noise_reduction* (атрибут БД «Inoise»). В результаті отриманий набір векторних даних міститиме по одному об'єкту на групу з однаковим значенням ширини смуги («Width»). На основі даної процедури векторними обчисленнями оновлюються значення коефіцієнту зниження рівня шуму на основі запиту (табл. 5).

Таблиця 5 / Table 5

Фрагмент процедури запиту до створення атрибуту «Inoise» /
A part of query for calculating the values of the «Inoise» attribute

```
CASE
WHEN ("Type_veg" = 4) AND ("I_width" <= 10) THEN 0.955
...
WHEN ("Type_veg" = 5) AND ("I_width" > 20 AND "I_width" <= 50) THEN 0.87
WHEN ("Type_veg" = 5) AND ("I_width" > 50) THEN 0.78
END
```

4. Передачі середньозважених за площами зелених зон значень коефіцієнту зниження рівня шуму у поле «Inoise» результуючого набору геоданих «BGI_noise», за допомогою процедур Vector general / module Join attributes by field value.

У якості ключового поля з'єднання таблиць слід використовувати ідентифікатор зеленої зони «ID» (рис. 1).

Реалізація II підпроцесу здійснюється шляхом:

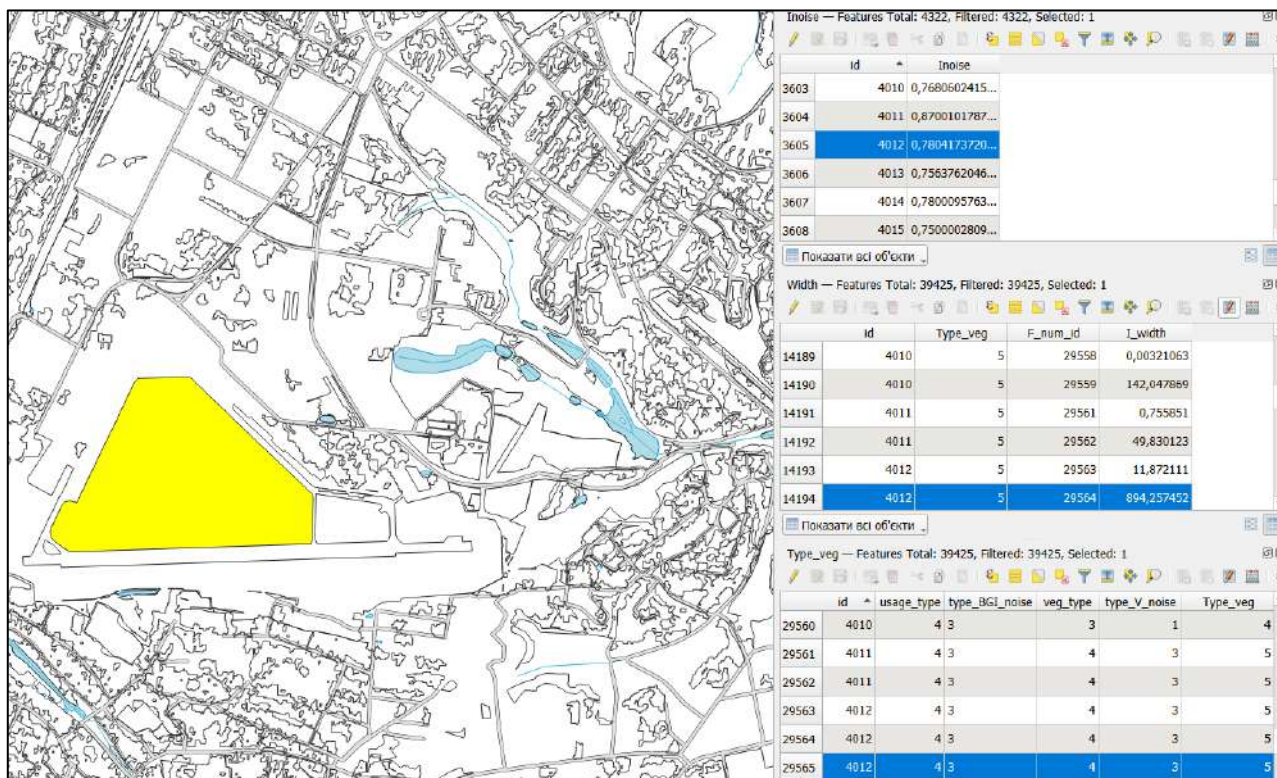


Рис. 1. Моделювання актуального стану зеленої зони /

Fig. 1. Modelling the existing condition of the green zone

1. обчислення середніх рівнів шуму Power_emission (атрибут БД «Pem»), що враховує клас автошляхів (див. табл.3) процедурами Vector Table/ module Field calculator векторних обчислень за запитами у векторному наборі «Road_noise». Процедуру запиту наведено в табл. 6.

2. Обчислення початкового рівня шуму на межі зеленої зони з урахуванням відстані від автошляху Cont_noise (атрибут БД «Cont_noise»), що базується на процедурах: Vector selection /

module Select by expression; Vector geometry / module Buffer; Vector overlay / module Intersection; Vector selection / module Select by location; Vector Table/ module Field calculator.

3. Пошуку зелених зон, які розташовані на відстані «distance» від джерела шуму, процедурами Vector general / module Join attributes by nearest та дообчислень «Cont_noise» процедурами Vector Table/ module Field calculator. Дообчислення відбуваються за допомогою запиту (табл. 7, рис. 2).

Таблиця 6 / Table 6

Фрагмент процедури запиту створення значень атрибуту «Pem» /
A part of query for calculating the values of the «Pem» attribute

```
CASE
WHEN ("fclass" = 'residential' OR "fclass" = 'unclassified' OR "fclass" = 'tertiary') THEN 71
...
WHEN ("fclass" = 'motorway' OR "fclass" = 'trunk') THEN 82.5
END
```

Таблиця 7 / Table 7

Фрагмент процедури запиту доповнення значень атрибуту «Cont_noise» /
A part of query for calculating the values of the «Cont_noise» attribute

```
CASE
WHEN "Cont_noise" IS NULL THEN "Pem" - ( "distance" * 0.005 )
...
END
```

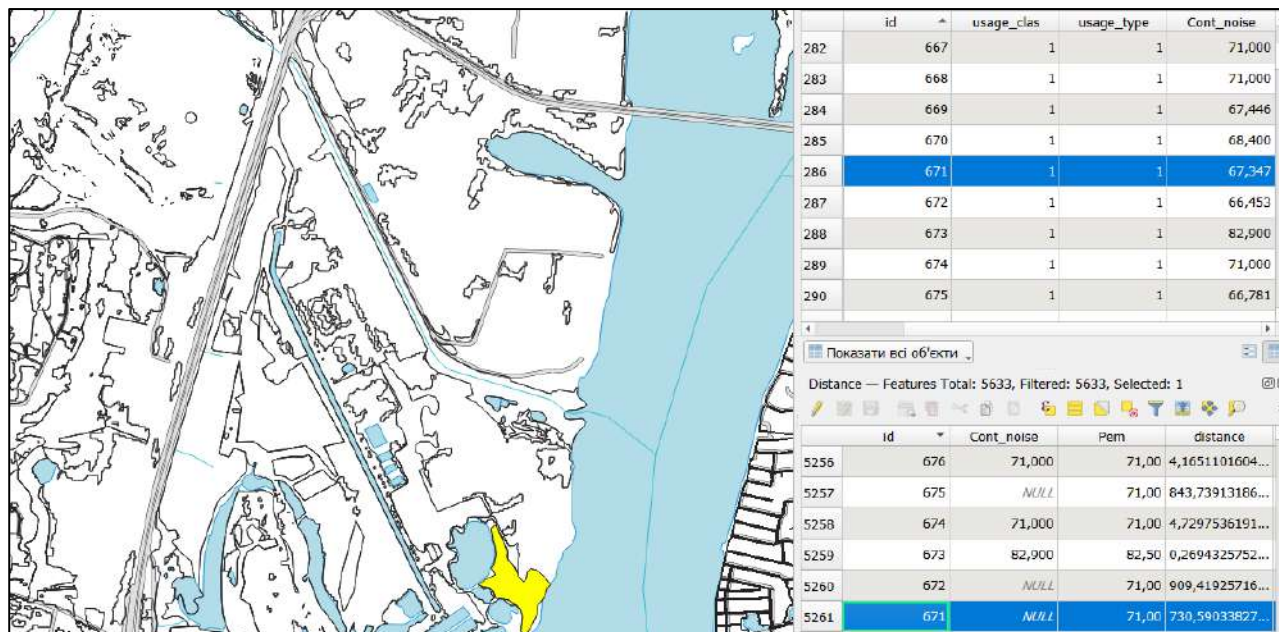


Рис. 2. Моделювання початкового поля шумового забруднення («Cont_noise») /

Fig. 2. Modelling the primary noise pollution field («Cont_noise»)

4. Передачі «Cont_noise» у набір геоданих «BGI_noise» з використанням процедур Vector general / module Join attributes by field value. У якості ключового поля з'єднання таблиць слід використовувати ідентифікатор зеленої зони «ID».

Реалізація III підпроцесу здійснюється шляхом:

1. моделювання «залишкового» рівня шуму в зеленій зоні Noise за процедурою Vector Table /

module Field calculator. Результат передається у атрибутивне поле «Noise» (рис. 3).

2. Моделювання ефективності виконання функції зі зниження рівнів шуму E_noise_reduction (атрибут БД «En_red»), виконується відповідно до процедури Vector Table/ module Field calculator. Результат передається у поле «En_red» (рис. 4).

Картографічна візуалізація результатів оцінки у середовищі ГІС визначається засобами

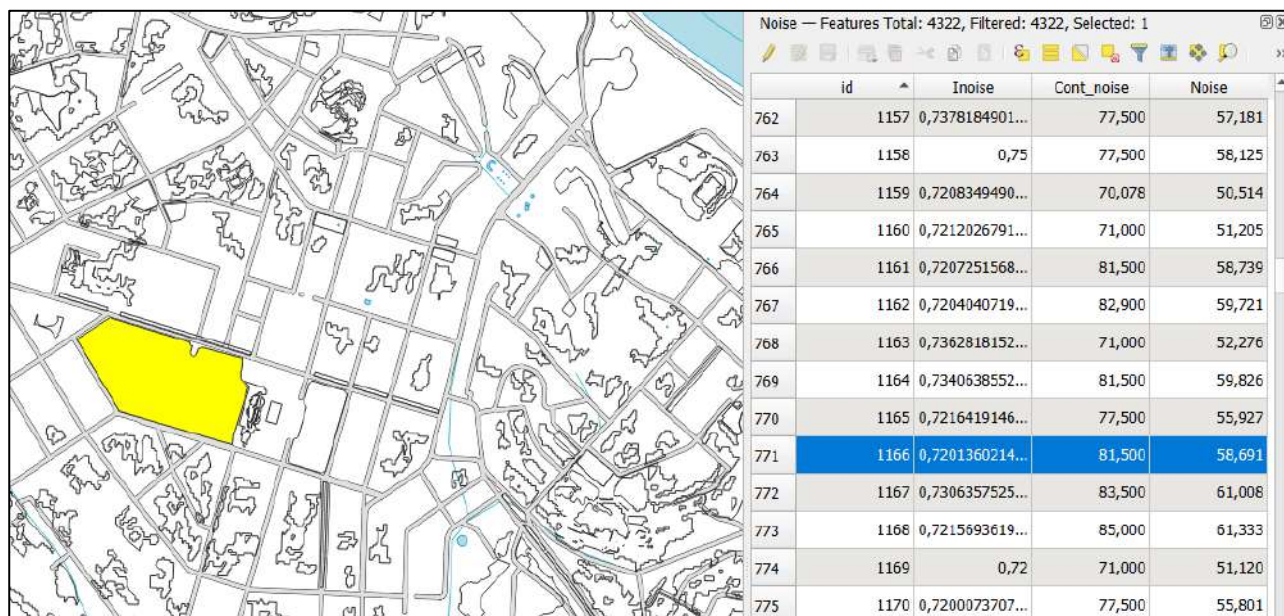


Рис. 3. Моделювання «залишкового» рівню шуму в зеленій зоні («Noise») /

Fig. 3. Modelling the «residual» noise level in the green zone («Noise»)

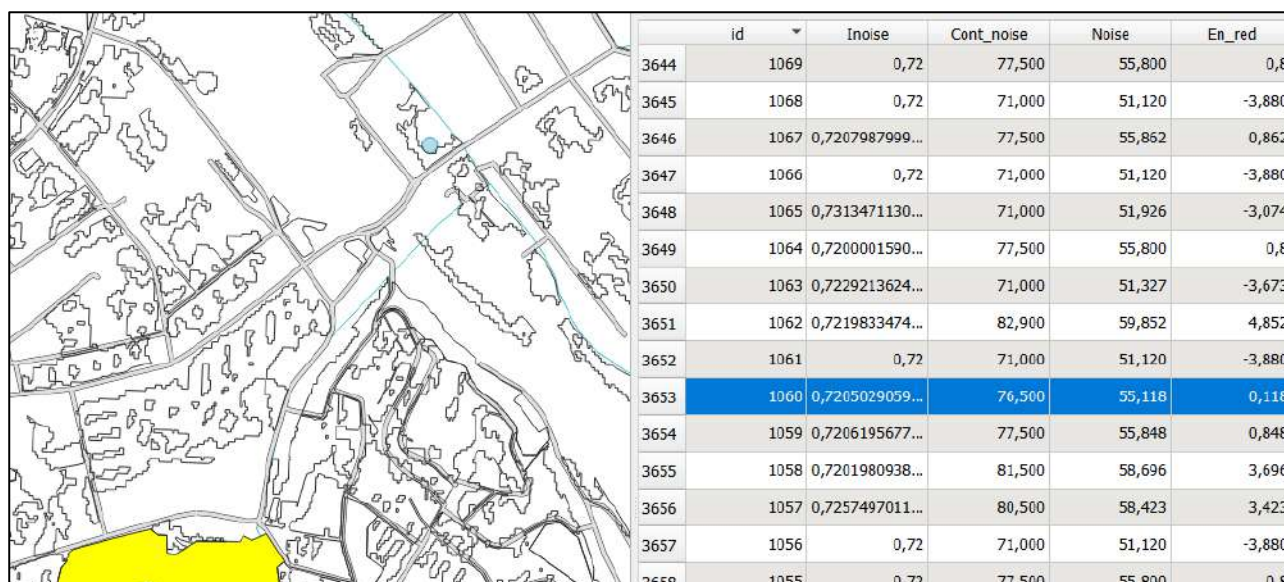


Рис. 4. Моделювання ефективності зниження рівнів шуму в МЗЗ /

Fig. 4. Modelling the effectiveness of noise reduction in the green spaces

представлення графічних змінних - точок/ліній/полігонів, які зокрема здатні підтримувати колірну заливку, прозорість та інше [4]. Картографічні інструменти середовища QGIS за допомогою функціоналу Symbology дозволяють візуалізувати атрибутику об'єктів набору геоданих. Зокрема, кількісні та/або якісні показники оцінки чи характеристик об'єктів картографуються у спосіб безперервного діапазону кольорів (Continuous Colour Symbols) або в спосіб встановлення кольорів на основі дискретних груп значень атрибутів - діапазонів (Graduated symbols). Кількість і межі діапазонів встановлюються відповідно до завдань оцінки [19].

Для визначення меж діапазонів в даній робо-

ті використаний метод ранжування значень *Equal interval* [15]. Вибірку значень «Cont_noise» було розподілено на 4 діапазони (рис. 6). З рисунку видно, що на межі МЗЗ найнижчі рівні шуму (до 73 дБ) спостерігаються у більш як половини зелених зон Києва. Значення до 70 дБ спостерігаються у 4,28% об'єктів, розташованих ближче до околиць. Значення 85дБ мають 2,71 % об'єктів [9].

Картографування актуального стану зеленої зони, за значеннями коефіцієнту зниження рівня шуму *I_noise reduction*, здійснювалося також в спосіб ранжованих шкал. Використовуючи шаблон Graduated symbols функціоналу Symbology візуалізація відбувалася за 5 діапазонами значень показника (рис. 7). З рисунку видно, що 75% МЗЗ

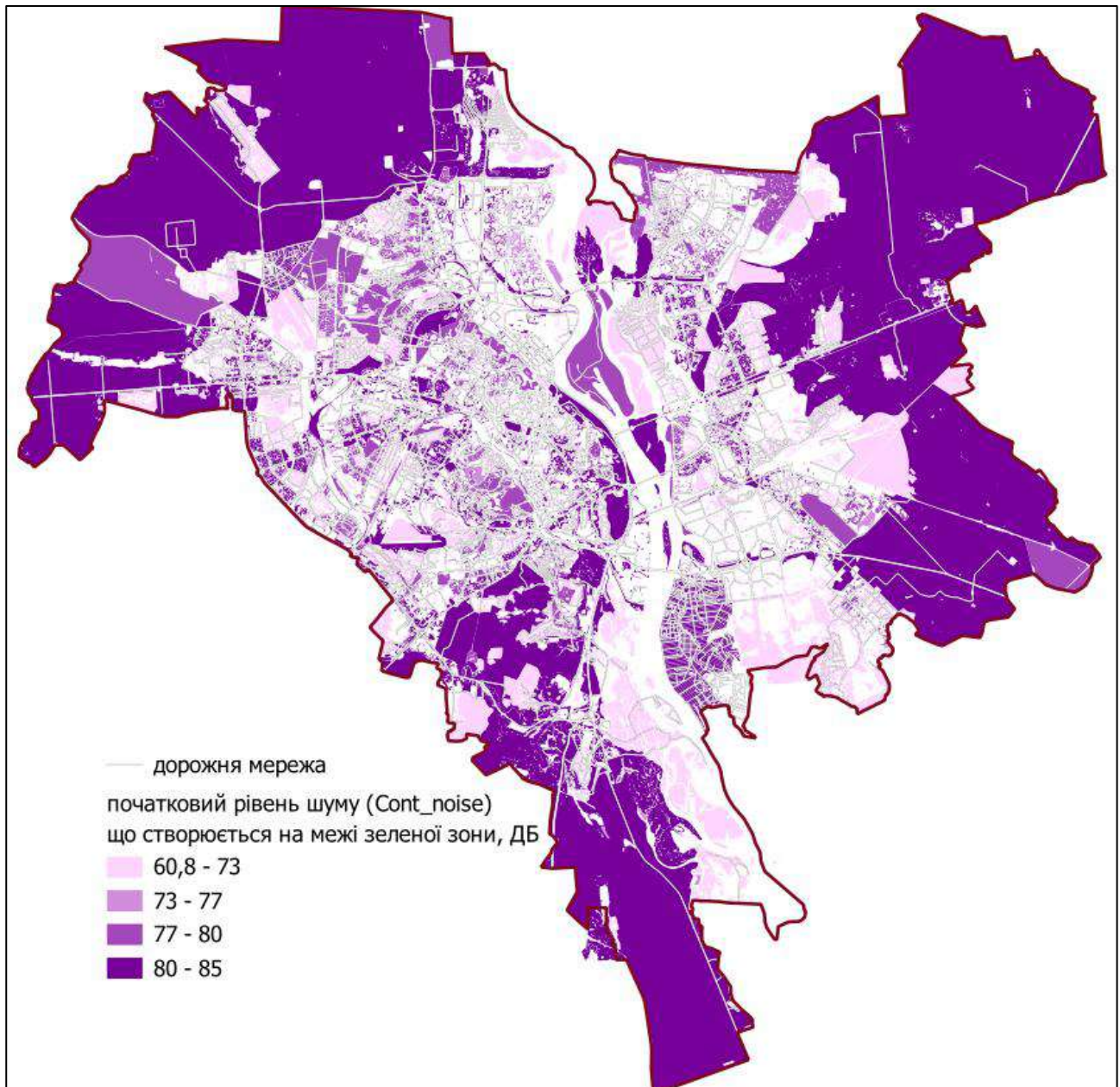


Рис.6. Моделювання початкового рівня шуму, що створюється на межі зеленої зони /
Fig. 6. Modelling the primary noise level that is generated on the border of the green zone

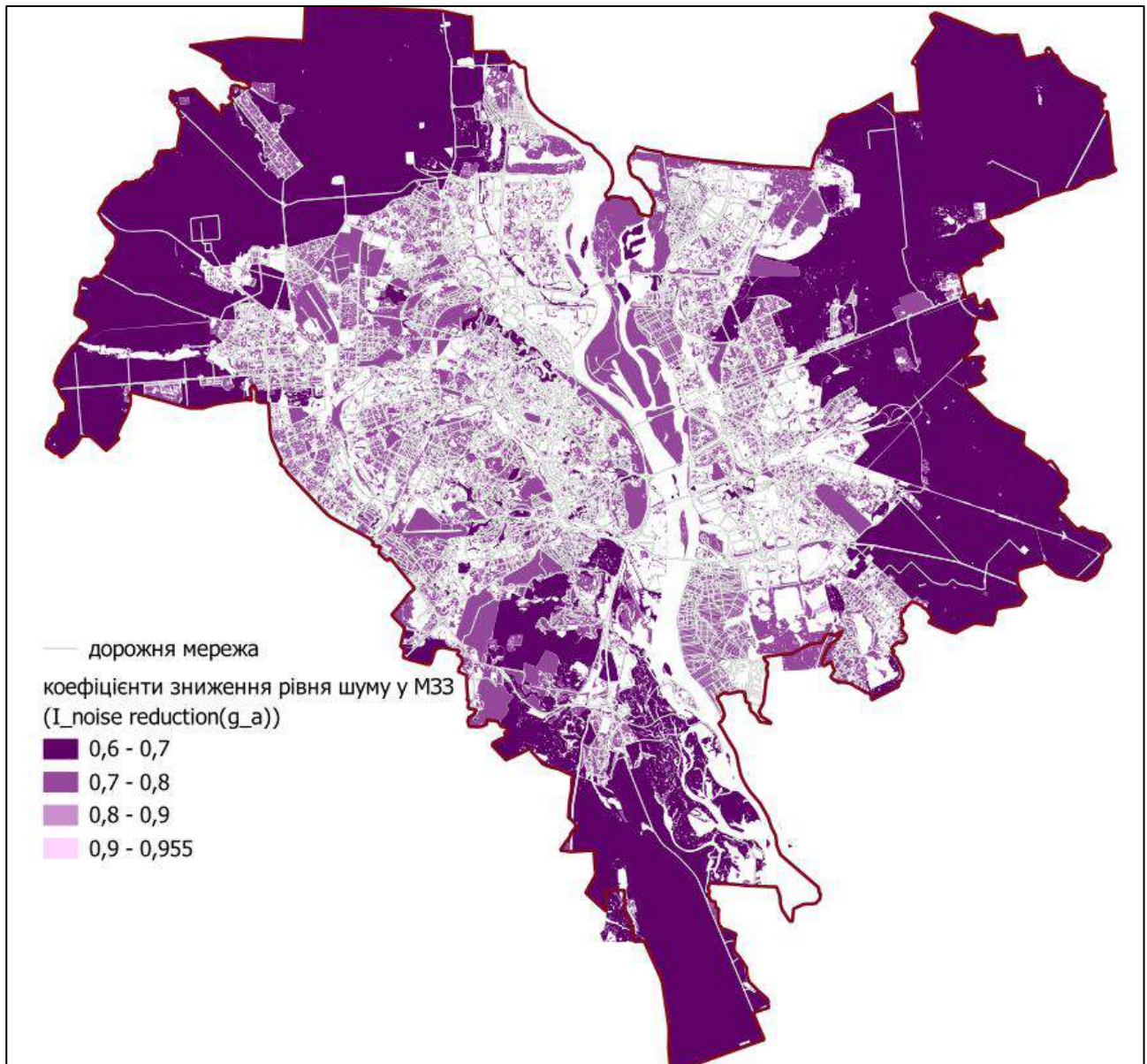


Рис. 7. Моделювання актуального стану зеленої зони,
за значеннями коефіцієнту зниження рівня шуму /
Fig. 7. Modelling the existing state of the green zone by the coefficient of noise reduction

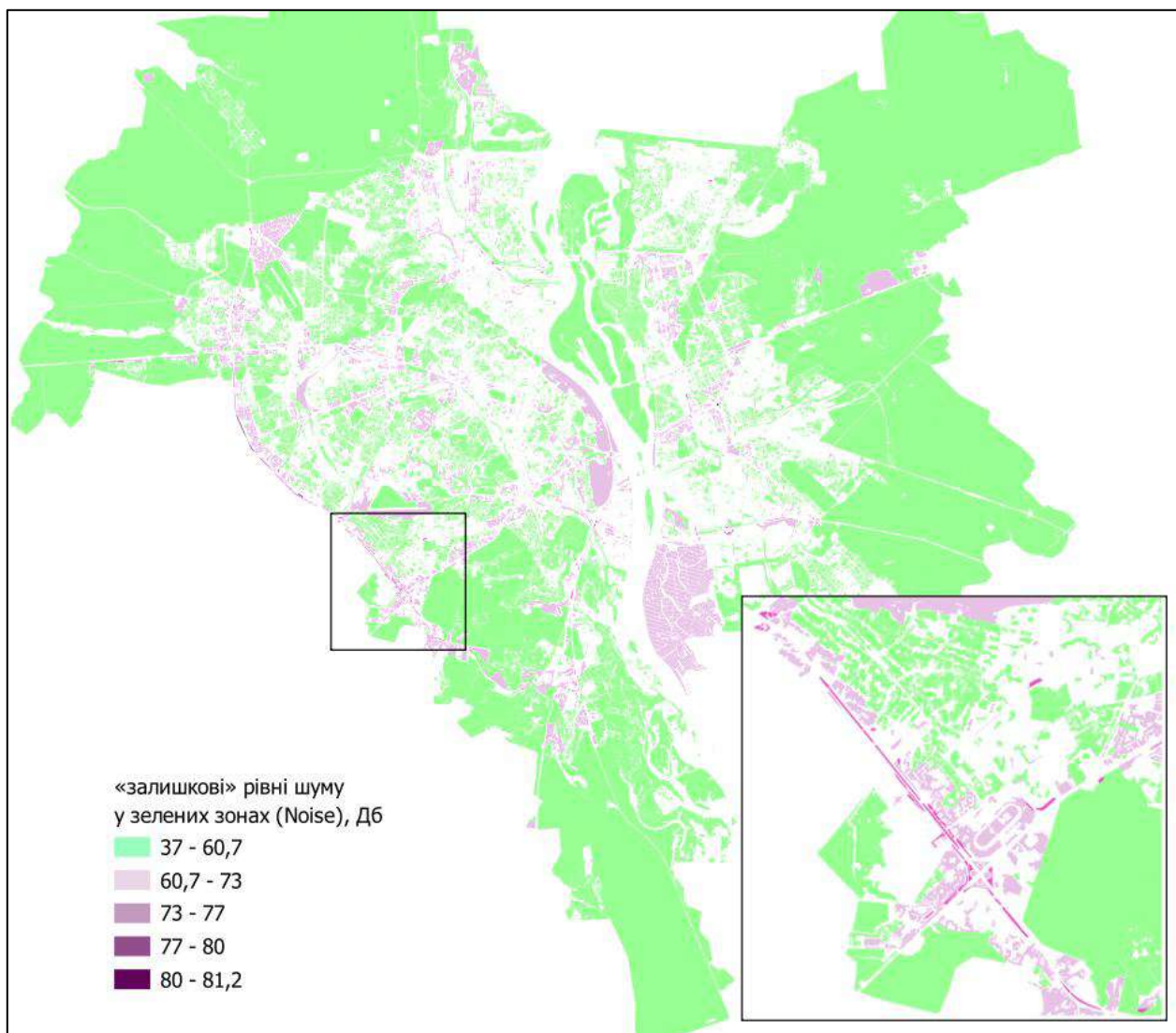


Рис.8. Моделювання «залишкового» рівню шуму в зеленій зоні /

Fig. 8. Modelling the «residual» noise level in the green zone

мають середній потенціал у зниженні рівнів шуму. Великі лісопарки на околицях міста, мають найкращий потенціал у зниженні рівнів шуму, хоча складають лише 8% від загальної кількості МЗЗ, проте займають суттєві площі [9].

Візуалізація «залишкового» рівню шуму в зеленій зоні здійснювалася через ранжування значень атрибуту «Noise» на 5 діапазонів (рис. 8). З рисунку видно, що 23% вибірки становлять МЗЗ, у яких «залишкові» рівні шуму складають 60,7-73 дБ, у той час як початкові рівні шуму такої сили *Cont_noise* – спостерігались у 55% об'єктів. Таким чином, у 90% МЗЗ автомагістральний шум ефективно нівелюється [9].

Картографічна візуалізація показників оцінювання ефективності здійснювалася в дихотомічному діапазоні всієї вибірки числових значень показників (*високоєфективні МЗЗ/ слабкоєфективні МЗЗ*) (рис. 9). Результати вказують на високу ефективність МЗЗ у виконанні даної функції, адже у 90% об'єктів створюються безпечні умови

перебування [9].

Висновки. В роботі представлена технологія геоінформаційного оцінювання та картографування ефективності міських зелених зон у зниженні рівня автомагістрального шуму, у якій за робочий інструментарій просторового аналізу та картографування править QGIS. Всі процедури оцінювання автоматизовано за допомогою середовища геообробки QGIS Model Designer і представлено у вигляді моделі Model_NOISE. Представлена технологія являє собою сукупність процедур підготовки та опрацювання геоданих для кількісного оцінювання ефективності МЗЗ у шумозниженні відповідно до методики. Процедури графічно об'єднані у автоматизовану модель обчислення в середовищі Model Designer QGIS для створення єдиного робочого процесу оцінки ефективності МЗЗ. Складовими представленої технології є загальний алгоритм проведення оцінки; автоматизована модель обчислення; база геоданих. Задля включення в оцінку всіх аспектів, що

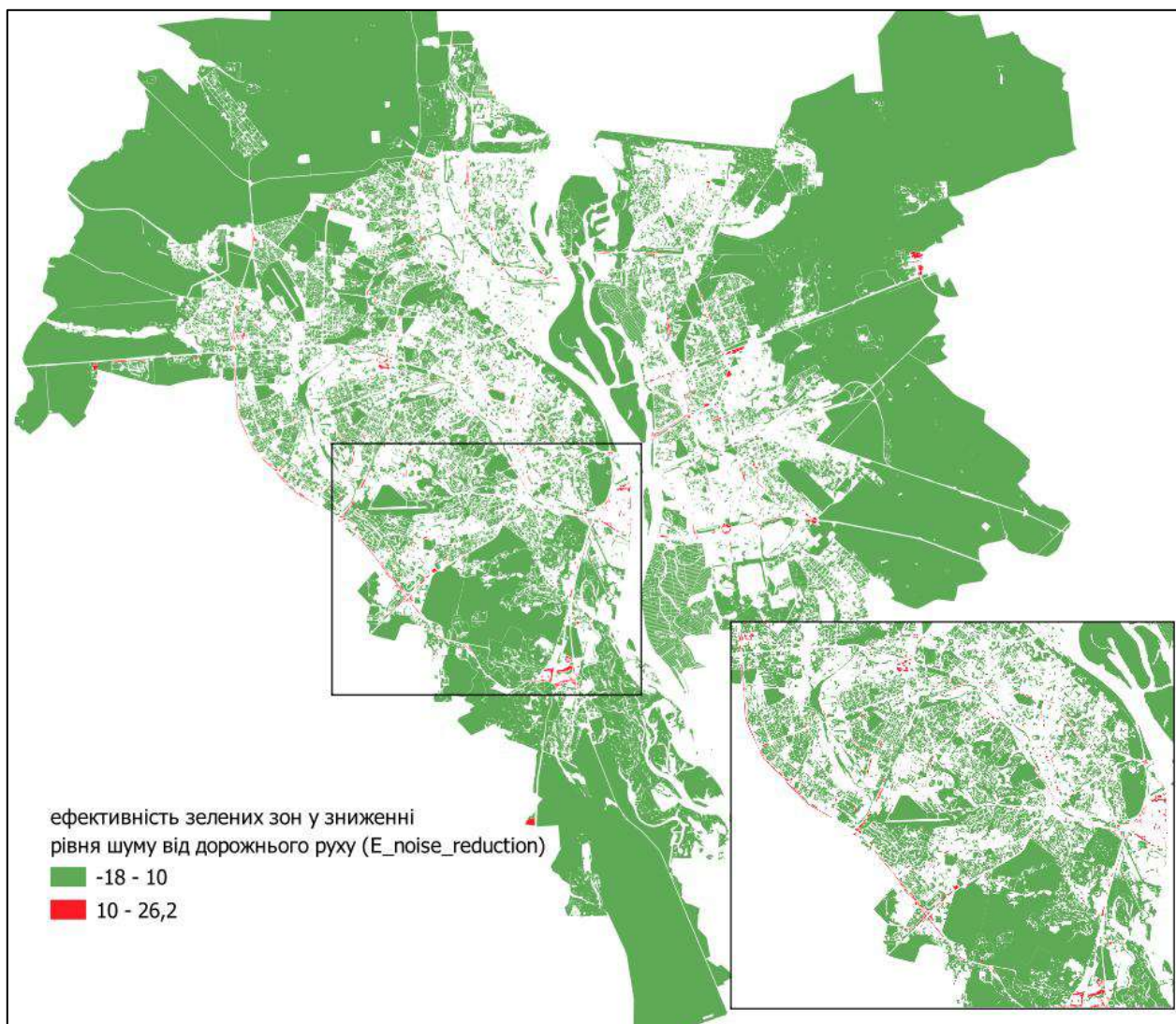


Рис. 9. Результат моделювання ефективності зелених зон у зниженні рівня шуму від дорожнього руху /
Fig. 9. The result of modelling the effectiveness of green zones in reducing traffic noise

обумовлюють ефективність зелених зон у виконанні функції зниження рівнів шуму, до БД у якості вхідної внесено інформацію про: міські зелені зони; дорожню мережу міста; рослинність та сформовано відповідні набори геоданих: «Vegetation» (.shp), «BGI» (.shp), «Roads» (.shp). Алгоритмічно робочий процес оцінювання в моделі включає кілька підпроцесів оцінки і забезпечується послідовними алгоритмами геообробки та модулями обчислень, що їх описують: 1. підпроцес визначення характеристик зеленої зони та її актуального стану, від яких залежить її ефективність в шумозахисті; 2. підпроцес обчислення первинного поля шумового забруднення від автошляхів з різною інтенсивністю транспортного потоку; 3. підпроцес визначення «залишкового» рівню шуму в

зеленій зоні та моделювання ефективності. У роботі також представлені результати картографічної візуалізації оцінки ефективності МЗЗ у шумозниженні для території міста Києва. Запропонована в роботі технологія є інструментом у практиці міського планування, оскільки є основою для прийняття управлінських рішень по підвищенню ефективності тих МЗЗ, що цього потребують при розробці проектів озеленення міст.

Подяка. Дане дослідження виконане в рамках проекту «Технологія геоінформаційного оцінювання надання екосистемних послуг міськими зеленими зонами», що фінансується за рахунок зовнішнього інструменту допомоги Європейського Союзу для виконання зобов'язань України у Рамковій програмі Європейського Союзу з наукових досліджень та інновацій «Горизонт 2020».

Список використаних джерел

1. Використання технологій озеленення з метою зниження шумового забруднення міських територій. (2023). Отримано з https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_vcheniy_secretar.pdf

2. ДБН В.1.1-31:2013. (2014). Захист територій, будинків і споруд від шуму. Отримано з https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/zakhist_vid_shumu/1-1-0-1814
3. Денисюк, Н. (2021). Середовищевірна ефективність зелених насаджень загального користування міста Рівне. Дис. ... к. б. н. Рівненський державний гуманітарний університет, Інститут екології Карпат НАН України
4. Дудун, Т. В., Тітова, С. В. (2017). Географічні карти та картографічний метод дослідження (1 том - Географічні карти) (2 том — Картографічний метод дослідження). Отримано з https://geo.knu.ua/wp-content/uploads/2021/06/kmd_2_tom_titova_dudun.pdf
5. Корогода, Н.П., Галаган, О.О. (2023). Оцінка зниження шуму від дорожнього руху міськими зеленими зонами. Інноваційні дослідження та перспективи розвитку науки і техніки у XXI столітті. Рівне, 2023 р., 159-161. <https://dspace.megu.edu.ua:8443/jspui/handle/123456789/4384>
6. Корогода, Н.П., Ковтонюк, О.В., Галаган, О.О., Купач, Т.Г. (2023). Геоінформаційне оцінювання екосистемних послуг з контролю швидкості ерозії ґрунту у ландшафтах міських зелених зон. Ландшафтознавство, 4 (2), 55-67. <https://doi.org/10.31652/2786-5665-2023-4-54-67>
7. Корогода, Н., Купач, Т. (2024). Технологічні особливості проведення оцінки культурних екосистемних послуг. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія». 60, 342- 353. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-25>
8. Корогода, Н.П. (2023). Оцінка екосистемних послуг зі зниження рівня шуму від дорожнього руху в міських ландшафтах. Ландшафтознавство, 3 (1), 56-67. <https://doi.org/10.31652/2786-5665-2023-3-56-67>
9. Корогода, Н.П. (2024). Оцінка ефективності надання екосистемних послуг зі зниження рівня шуму від дорожнього руху у міських зелених зонах міста (на прикладі міста Києва). Конструктивна географія та раціональне використання природних ресурсів, 4 (спец.), 69-74. <https://doi.org/10.17721/2786-4561.2024.4.special-10/19>
10. Міронова, Н. Г., Морозов, А. В., Морозова, Т. В., Рибак, В. В. (2021). Дослідження акустичного навантаження від транспортного потоку на прикладі міста Хмельницького. Дороги і мости, 24, 193–205. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2021.24.193>
11. Решетченко, А. (2018). Дослідження впливу автотранспортних потоків на акустичне середовище урболандшафтів. Комунальне господарство міст, 7 (146), 180-183. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2018-7-146-180-183>
12. Решетченко, А. (2020). Підвищення екологічної безпеки урбосистем при техногенному навантаженні від шумового забруднення. Дис. ... к. т. н. Сумський державний університет.
13. Розробка шумозахисних заходів для автомобільних доріг Дніпровського району Дніпропетровської області. (2020). Отримано з https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_vcheniy_secretar.pdf
14. Шевченко, Ю. (2016). Розробка моделей оцінки та підвищення ефективності зниження шуму транспортних потоків. Дис. ... к. т. н. Національний авіаційний університет
15. ArcGIS Pro. Data classification methods. (2024). Отримано з <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/mapping/layer-properties/data-classification-methods.htm>
16. Buchhorn, M., Smets, B., Bertels, L., De Roo B., et al. (2020). Copernicus Global Land Service: Land Cover 100m: collection 3: epoch 2019: Globe (V3.0.1). [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3939050>
17. Cohen, P., Potchter, O., Schnell, I. (2014). The impact of an urban park on air pollution and noise levels in the Mediterranean city of Tel-Aviv, Israel. Environmental Pollution, 195, 73-83 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.08.015>
18. Gratani, L., Varone, L. (2013). Carbon sequestration and noise attenuation provided by hedges in Rome: the contribution of hedge traits in decreasing pollution levels. Atmospheric Pollution Research, 4 (3), 315-322. <https://doi.org/10.5094/APR.2013.035>
19. Mitchell, A. (2005). The ESRI Guide to GIS Analysis, Volume 2: Spatial Measurements and Statistics. 1st Edition
20. Nunho dos Reis, A. R., Biondi, D., Dias de Oliveira, J. (2022). The role of urban green areas in noise pollution attenuation. DYNA, 89 (220), 210–215. <https://doi.org/10.15446/dyna.v89n220.95822>
21. OpenStreetMap contributors. (2023). Отримано з www.openstreetmap.org.
22. Ow, L. F., Ghosh, S. (2017). Urban cities and road traffic noise: Reduction through vegetation. Applied Acoustics, 120, 15-20. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.01.007>
23. Stansfeld, A., Matheson, P., Stansfeld, M. (2003). Noise pollution: non-auditory effects on health. British Medical Bulletin, 68, 243–257.
24. Van Renterghem, T., Forssén, J., Attenborough, K. et al. (2015). Using natural means to reduce surface transport noise during propagation outdoors. Applied Acoustics, 92, 86-101. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.01.004>
25. Welch, D., Shepherd, D., Dirks, K.N. et al. (2013). Road traffic noise and health-related quality of life: A cross-sectional study. Noise & Health, 15, 224–230.
26. Xing, Y., Brimblecombe, P. (2020). Traffic-derived noise, air pollution and urban park design. Journal of Urban Design, 25(5), 590-606. <https://doi.org/10.1080/13574809.2020.1720503>
27. Zanaga, D., Van De Kerchove, R., De Keersmaecker, W., et al. (2021). ESA WorldCover 10 m 2020 v100. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5571936>
28. Dias de Oliveira, J., Biondi D., Rodrigo Nunho dos Reis, A. (2022). The role of urban green areas in noise pollution attenuation. DYNA, 89(220), 210-215. <https://doi.org/10.15446/dyna.v89n220.95822>
29. Maksymenko, N., Sonko, S., Skryhan, H., et al. (2021). Green Infrastructure of Post-USSR Cities for Prevention of Noise Pollution. SHS Web Conf., 100, 05004. <https://doi.org/10.1051/shsconf/202110005004>
30. Bunn, F., Paulo, Henrique Trombetta, Z. (2015). Urban planning-Simulation of noise control measures. Noise Control Engineering Journal, 63(1), 1-10. <https://doi.org/10.3397/1/376301>

31. Bocher, E., Guillaume, Gw., Picaut, J., et al. (2019) NoiseModelling: An Open Source GIS Based Tool to Produce Environmental Noise Maps. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(3), 130 <https://doi.org/10.3390/ijgi8030130>
32. Jinming, Zhang, Jun, Huang, Zezhou, Wu, Zhangmiao, Li. (2024). Construction Noise Reduction Research on Rail Transit Projects: A Case Study in China. *Buildings*, 14(6), 1678. <https://doi.org/10.3390/buildings14061678>

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Technology for geoinformation assessment and mapping of the effectiveness of urban green spaces in motorway noise reducing

Nataliia Korohoda¹

PhD (Geography), Associate Professor, Department of Geography of Ukraine,

¹ Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine;

Tetiana Kupach¹

PhD (Geography), Associate Professor, Department of Geography of Ukraine

ABSTRACT

Noise is one of the factors that determine the quality of life in cities. Motorways are the main sources of urban noise. Protecting the urban population from motorway noise is one of the leading functions performed by urban green spaces (UGS). However, not all UGSs have equal "efficiency" in performing this function, as their vegetation has different surface areas in contact with sound waves. Accordingly, an efficiency assessment is necessary to improve the comfort of living in the city, as it allows to identify those UGSs that require priority management decisions to ensure their optimal functioning. At present, there is a lack of technologies that are easy to use and can be used to determine the condition of green spaces and their effectiveness in performing this function. Accordingly, **the purpose of this paper** is to describe the technology of geoinformation assessment of the effectiveness of UGS in reducing motorway noise and mapping the assessment results.

Methodologically, the technology is a set of procedures for preparing and processing geodata to assess the effectiveness of UGS in noise reduction in accordance with the assessment algorithm. The procedures are composed of algorithmic chains graphically integrated into the automated calculation model Model_NOISE in the QGIS Model Designer. The components of the technology are a general assessment algorithm; an automated calculation model; and a geodatabase. The technology envisages inclusion of all aspects that determine the effectiveness of the UGS in the assessment and therefore includes procedures for geoprocessing of preliminary preparation of input data. The assessment workflow in Model_NOISE includes the following sub-processes: 1. determining the characteristics of the green space and its current state; 2. calculating the primary noise pollution field from motorways; 3. determining the "residual" noise level in the green space and its effectiveness.

As a **result**, using the proposed geoprocessing algorithms and calculation modules, we carried out: A). modelling the initial noise level - *Cont_noise*; B) modelling the current state of the green area - *I_noise reduction*; C) modelling the "residual" noise level in the green area - *Noise*; D) modelling the efficiency of urban green areas in reducing noise levels in cities - *E_noise_reduction*. The paper presents the results of mapping the indicators *I_noise reduction*, *Cont_noise*, *Noise*, *E_noise_reduction* for UGSs of Kyiv.

Thus, the paper **solves the scientific task** of creating a technology that makes it easy to determine the condition of green spaces and their effectiveness in reducing motorway noise. The technology is used to process spatially distributed, often limited information, which makes its use accessible not only to scientists but also to urban planners.

The technology, which is a "geoinformation embodiment" of the assessment methodology **and the results of its cartographic presentation** for the territory of Kyiv, **are effective tools in urban planning practice**, to improve the efficiency of urban green spaces and the comfort of living for its residents.

Keywords: urban green spaces (UGS), technology, motorway noise, geodatabase, automated calculation models.

References

1. Use of greening technologies to reduce noise pollution in urban areas. (2023). Retrieved from https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_vcheniy_secretar.pdf [in Ukrainian].
2. DBN V.1.1-31:2013. (2014). Protection of territories, buildings and structures from noise. Retrieved from https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/zakhist_vid_shumu/1-1-0-1814 [in Ukrainian].
3. Denysyuk, N. (2021). Environment-forming efficiency of greenery of common use in Rivne. Thesis for a candidate of biological sciences. Rivne State University for the Humanities, Institute of Ecology of the Carpathians the National Academy of Sciences of Ukraine. [in Ukrainian].
4. Dudun, T. V., Titova, S. V. (2017). Geographical maps and the cartographic method of research (volume 1 - Geographical maps) (volume 2 - cartographic method of research). Retrieved from https://geo.knu.ua/wp-content/uploads/2021/06/kmd_2_tom_titova_dudun.pdf [in Ukrainian].

5. Korohoda, N.P., Halahan, O.O. (2023). Assessment of traffic noise reduction by urban green spaces. *Innovative research and prospects for the development of science and technology in the 21st century*. Rivne, 2023, 159-161. [in Ukrainian].
6. Korohoda, N. P., Kovtoniuk, O. V., Halahan, O. O., Kupach, T. H. (2023). Geoinformation assessment of ecosystem services for controlling the rate of soil erosion in landscapes of urban green zones. *Landscape Science*, 4 (2), 55-67. doi: <https://doi.org/10.31652/2786-5665-2023-4-54-67> [in Ukrainian].
7. Korohoda, N., Kupach, T. (2024). Technological features of cultural ecosystem services assessment. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (60), 342-353. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-25> [in Ukrainian].
8. Korohoda, N.P. (2023). Assessment of ecosystem traffic noise reduction service in the urban landscapes. *Landscape Science*, 3 (1), 56-67. <https://doi.org/10.31652/2786-5665-2023-3-56-67> [in Ukrainian].
9. Korohoda, N.P. (2024). Assessment of the effectiveness of ecosystem traffic noise reduce services in urban green spaces (on the example of Kyiv). *Constructive geography and rational use of natural resources*, 4, 69-74. <https://doi.org/10.17721/2786-4561.2024.4.special-10/19> [in Ukrainian].
10. Mironova, N., Morozov, A., Morozova, T., Rybak, V. (2021). Investigation of acoustic load from traffic flow on the example of the city of Khmelnytsky. *Roads and bridges*, 24, 193–205. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2021.24.193> [in Ukrainian].
11. Reshetchenko, A. (2018). Duration of elementary events in the structure of noise of road motion of the great city. *Urban municipal services*, 7 (146), 180-183. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2018-7-146-180-183> [in Ukrainian].
12. Reshetchenko, A. (2020). Improvement of the environmental safety of urban systems under man-caused impact from noise pollution. Thesis for the degree of candidate of Engineering Sciences. Sumy State University. [in Ukrainian].
13. Development of noise protection measures for motorways in Dniprovskiy district of Dnipropetrovska oblast (2020). Retrieved from https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_vcheniy_secretar.pdf [in Ukrainian].
14. Shevchenko, Yu. (2016). Development of evaluation models and improvement of the efficiency of traffic flow noise reduction. Thesis for a candidate of technical sciences. National Aviation University [in Ukrainian].
15. ArcGIS Pro. Data classification methods. (2024). Retrieved from <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/mapping/layer-properties/data-classification-methods.htm>
16. Buchhorn, M, Smets, B., Bertels, L., De Roo, B., et al. (2020). Copernicus Global Land Service: Land Cover 100m: collection 3: epoch 2019: Globe (V3.0.1) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3939050>
17. Cohen, P., Potchter, O., Schnell, I. (2014). The impact of an urban park on air pollution and noise levels in the Mediterranean city of Tel-Aviv, Israel. *Environmental Pollution*, 195, 73-83 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.08.015>.
18. Gratani, L., Varone, L. (2013). Carbon sequestration and noise attenuation provided by hedges in Rome: the contribution of hedge traits in decreasing pollution levels. *Atmospheric Pollution Research*, 4 (3), 315-322. <https://doi.org/10.5094/APR.2013.035>
19. Mitchell, A. (2005). *The ESRI Guide to GIS Analysis, Volume 2: Spatial Measurements and Statistics*. 1st Edition.
20. Nunho dos Reis, A. R., Biondi, D., Dias de Oliveira, J. (2022). The role of urban green areas in noise pollution attenuation. *DYNA*, 89 (220), 210–215. <https://doi.org/10.15446/dyna.v89n220.95822>
21. OpenStreetMap contributors. (2023). Retrieved from www.openstreetmap.org.
22. Ow, L. F., Ghosh, S. (2017). Urban cities and road traffic noise: Reduction through vegetation. *Applied Acoustics*, 120, 15-20. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.01.007>
23. Stansfeld, A., Matheson, P., Stansfeld M. (2003). Noise pollution: non-auditory effects on health. *British Medical Bulletin*, 68, 243–257.
24. Van Renterghem, T., Forssén, J., Attenborough, K. et al. (2015). Using natural means to reduce surface transport noise during propagation outdoors. *Applied Acoustics*, 92, 86-101. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.01.004>.
25. Welch, D., Shepherd, D., Dirks K.N. et al. (2013). Road traffic noise and health-related quality of life: A cross-sectional study. *Noise & Health*, 15, 224–230.
26. Xing, Y. & Brimblecombe, P. (2020). Traffic-derived noise, air pollution and urban park design. *Journal of Urban Design*, 25:5, 590-606. <https://doi.org/10.1080/13574809.2020.1720503>
27. Zanaga, D., Van De Kerchove, R., De Keersmaecker, W., et al. (2021). ESA WorldCover 10 m 2020 v100. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5571936>
28. Dias de Oliveira, J., Biondi, D., Rodrigo Nunho dos Reis, A. (2022). The role of urban green areas in noise pollution attenuation. *DYNA*, 89(220), 210-215. <https://doi.org/10.15446/dyna.v89n220.95822>
29. Maksymenko, N., Sonko, S., Skryhan, H., et al. (2021) Green Infrastructure of Post-USSR Cities for Prevention of Noise Pollution. *SHS Web Conf.*, 100, 05004. <https://doi.org/10.1051/shsconf/202110005004>
30. Bunn, F., Paulo Henrique Trombetta, Z. (2015). Urban planning-Simulation of noise control measures. *Noise Control Engineering Journal*, 63(1), 1-10. <https://doi.org/10.3397/1/376301>
31. Bocher, E., Guillaume, Gw., Picaut, J., Petit, Gw., Fortin, N. (2019). NoiseModelling: An Open Source GIS Based Tool to Produce Environmental Noise Maps. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(3), 130. <https://doi.org/10.3390/ijgi8030130>
32. Jinming, Zhang, Jun, Huang, Zezhou, Wu, Zhangmiao, Li. (2024). Construction Noise Reduction Research on Rail Transit Projects: A Case Study in China. *Buildings*, 14(6), 1678. <https://doi.org/10.3390/buildings14061678>

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 17 November 2024

Accepted 20 January 2025

Analyzing urban morphology changes using neural networks

Sergiy Kostrikov

DSc (Geography), Professor, K. Niemets Department of Human Geography and Regional Studies,
V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine,

e-mail: sergiy.kostrikov@karazin.ua,  <https://orcid.org/0000-0002-4236-8474>

ABSTRACT

Introduction to the problem. Urbanization demands advanced tools to analyze morphological changes caused by hostilities or disasters. This study bridges this gap by integrating artificial neural networks (ANNs) with LiDAR and GIS technologies, focusing on a site in Kharkiv, Ukraine, which was marginally impacted by the 2022 Russian invasion. Our key objective is to quantify urban resilience and transformation under extreme stress.

Review of previous works. Advances in CNNs and RNNs have enabled spatial-temporal analysis of LiDAR and multisource data. Recent methodologies improved feature extraction for urban change detection. However, gaps persisted in hostilities' zone analysis, airborne and terrestrial LiDAR integration, and interpretability of ANN-driven insights.

Exposition of the main research material. Basics of ANNs for urban studies. This study employs two custom architectures: 1. *ANN Similarity (Enhanced)*: A feedforward network using Mean Squared Error (MSE) loss and cosine similarity to predict dataset similarities. 2. *Latest ANN Method*: A deeper network with contrastive loss and Euclidean distance, emphasizing dissimilarity detection via convolutional/recurrent layers.

Applications in urban studies. The ANNs in this study were applied to the following from several listed industrial domains: 1. *Routine Urban Monitoring*: Detecting new constructions/demolitions in Tallinn, ESTONIA. 2. *Hostilities Impact Analysis*: Identifying war-induced structural changes in Kharkiv, UKRAINE. 3. *3D Feature Extraction*: Automating building volumetry and change detection mapping from LiDAR point clouds.

Urban Remote Sensing with LiDAR. LiDAR's millimeter-level accuracy enabled 3D modeling of urban features (e.g., building footprints, microtopography). Airborne (ALS) and mobile (MLS) LiDAR datasets were processed via proprietary *iQ City Change Management (CCM)* software, addressing challenges like ALS/MLS alignment and artifact filtering via point-density thresholds.

Case Study: urban change detection using LiDAR to assess hostilities' impact. Methodology: the study analyzed multitemporal LiDAR datasets: Kharkiv (2019–2022): a 4 km² zone in Northern Saltivka, devastated by shelling. Tallinn (2017–2022): control datasets for routine redevelopment.

CCM Workflow: 1. *Building Extraction (BE)*: identified structural features (Area, Volume, Height). 2. *Change Detection (CD)*: classified changes as *Added* (new construction), *Removed* (demolition), or *Unchanged*.

ANN Analysis for comparing detected changes through *Wolfram Mathematica*: compared ANSE (similarity-focused) and LANN (dissimilarity-driven) methods. **Results:** The following changes detected. Kharkiv: 215 *Added* (pre-war redevelopment) and 51 *Removed* (war-induced demolitions) changes. The LANN method revealed stark contrasts (score: 0.35 and 0.32-0.42) between war-driven vs. routine redevelopment demolitions, capturing irregular demolitions. Tallinn: predictable redevelopment patterns (scores: 0.60-0.66 and 0.74), validating ANN accuracy for routine changes. **Implications:** LANN's sensitivity to hidden features (e.g., structural degradation) gives policymakers detailed guidance for post-war recovery, and its divergence from statistical models highlights AI's power to reveal unseen urban dynamics.

Conclusion. This research demonstrates how ANNs, fused with LiDAR/GIS, transcend traditional urban monitoring limitations. The framework offers scalable tools for disaster recovery, particularly in war zones.

Keywords: LiDAR, urban studies, urban remote sensing, desktop software, building extraction, change detection, neural networks, analytical software, the first (ANSE) and the second (LANN) ANN analysis methods.

In cites: Kostrikov Sergiy (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>

Introduction to the problem. Over the past several decades, the world has undergone a profound transition into an information-driven society, where urbanization has emerged as one of the most transformative forces of the 21st century. By 2050, nearly 70% of the global population is projected to reside in cities, a trend accompanied by unprecedented spatial, social, and environmental challenges [1]. Rapid urban expansion, coupled with dynamic morphological transformations - ranging from vertical densification to sprawling peri-urbanization - has necessitated advanced analytical frameworks capable of capturing and interpreting these changes with precision. In this context, geoinformation technologies, particularly

Geographic Information Systems (GIS) and Urban Remote Sensing (URS), have become indispensable. Tools such as LiDAR (Light Detection and Ranging) now provide millimeter-level accuracy in 3D urban mapping, enabling researchers to quantify structural changes in building heights, road networks, and green spaces with unprecedented fidelity [2]. Yet, as cities evolve into increasingly complex systems, traditional analytical methods struggle to decode the non-linear interactions between human activities, infrastructure, and ecological processes, that all define modern urban geosystems [3].

Our paper addresses this critical gap by integrating artificial intelligence (AI) in its artificial neural

network (ANN) presentation with geospatial technologies to redefine urban monitoring paradigms. The case is, that conventional approaches to urban change detection, rooted in 2D cartographic analysis and manual interpretation, often fail to account for the multidimensional nature of urban growth. For instance, methods relying on spectral indices or pixel-based classifications frequently overlook subtle morphological shifts, such as rooftop modifications or incremental land-use transitions, which are vital for understanding urban resilience [4]. Neural networks, however, offer a transformative alternative. By leveraging their capacity to discern intricate patterns within vast, heterogeneous datasets - from LiDAR point clouds to multi-temporal satellite imagery - these models excel at automating the detection of both abrupt and incremental urban changes, even in data-scarce environments.

Our research is anchored in the urbogeosystemic framework [3, 5, 6] which conceptualizes cities as dynamic, interconnected systems where natural and anthropogenic elements coevolve [7]. This paradigm shift demands tools that can synthesize disparate data streams into cohesive 3D representations of urban form and function. To this end, we employ LiDAR-derived digital elevation models (DEMs) and GIS layers to reconstruct high-resolution urban models, capturing features such as building volumetry, vegetation density, and microtopographic variations. These models serve as the training substrate for neural network architectures, including Convolutional Neural Networks (CNNs) for spatial feature extraction and Recurrent Neural Networks (RNNs) for temporal pattern recognition. For example, CNNs trained on LiDAR data can identify unauthorized vertical expansions in informal settlements, while RNNs applied to decadal satellite imagery reveal cyclical land-use transitions in peri-urban zones [8].

A novel contribution of this study lies in its comparative analysis of urban areas undergoing routine development versus those disrupted by extraordinary events, such as military hostilities or climate-induced disasters. In post-war/disaster contexts, neural networks can disentangle patterns of reconstruction from chaotic urban decay, offering insights into systemic resilience [9]. For instance, in cities recovering from earthquakes, our framework distinguishes between planned rebuilding and ad-hoc construction, enabling policymakers to prioritize resource allocation. Similarly, in post-war /post-conflict zones, the detection of subtle morphological changes - such as the emergence of informal barriers or the degradation of green corridors - provides early warnings of socio-ecological fragmentation. Such capabilities are not merely technical advancements but essential tools for fostering equitable urban governance.

The key objective of this study is to develop and

validate a neural network-driven framework for analyzing urban morphology changes, leveraging LiDAR and GIS technologies to detect and quantify both routine urban development and disruptions caused by extraordinary events, such as armed conflicts, military hostilities, or natural disasters. As a case study, we focus on the city of Kharkiv, Ukraine, which experienced severe urban disruptions during the first three months of the full-scale Russian invasion (February–April 2022). This period of intense hostilities provides a critical context for examining the resilience and morphological transformations of urban systems under extreme stress.

We have implemented the original concept by integrating two key artificial neural network (ANN) approaches for change detection comparison – so called the “ANN Similarity (Enhanced) method” and the “Latest ANN method” - both of which we developed. They illustrate how different ANN configurations can be used to analyze urban changes from multiple perspectives, providing a more nuanced understanding of the data. Thus, the research seeks to automate the identification of subtle morphological shifts, such as building modifications, vegetation loss, and infrastructure degradation, while providing comparative insights into the resilience and recovery patterns of urban systems. The ultimate goal is to equip urban planners and policymakers with a scalable, AI-enhanced toolset for evidence-based decision-making in sustainable urban development and disaster recovery.

The implications of this work extend beyond the only academic field. Urban planners increasingly face pressure to balance growth with sustainability, particularly in regions grappling with climate vulnerability. By automating the detection of illegal land encroachments or quantifying the carbon sequestration potential of urban forests, our neural network-driven approach equips stakeholders with actionable intelligence for evidence-based decision-making. Furthermore, the scalability of this methodology, applicable to megacities and small towns alike, ensures its relevance across diverse geographic and socio-economic contexts.

Thus, our paper demonstrates how neural networks transcend the limitations of traditional geospatial tools, offering a robust, scalable solution for monitoring urban evolution. By fusing cutting-edge AI with LiDAR and GIS technologies, we advance both the theory and practice of urban morphology analysis, providing a blueprint for smarter, more resilient cities in an era of rapid global change.

Review of previous works. The analysis of urban morphology changes has significantly advanced with the integration of neural networks, offering enhanced accuracy and efficiency in detecting and interpreting urban transformations [10–14]. Our shor-

tened literature survey explores the evolution of methodologies in this domain, highlighting key studies and their contributions.

Early developments in neural network applications. The application of artificial neural networks (ANNs) in urban change detection began gaining traction in the early 2000s. Pioneering studies, such as those referred to in [10], developed ANN-based methods to identify newly urbanized areas using Landsat Thematic Mapper images from different dates. These approaches often utilized principal component analysis (PCA) to extract salient features, reducing data dimensionality before applying ANNs for change detection [11]. Similarly, research employing ARTMAP neural networks demonstrated effective urban change detection with Landsat TM images, underscoring the potential of neural networks in this field [12]. Subsequent work [13] introduced neural networks to model land-use changes in watersheds, emphasizing their predictive capabilities, while other authors expanded this to multitemporal land cover classification [14].

Advancements with deep learning techniques. The evolution of deep learning has further propelled urban morphology analysis. Convolutional Neural Networks (CNNs) have been particularly influential. A notable study introduced a strategy for extracting indicators from large-scale orthoimages of varying resolutions using CNNs, facilitating urban change detection with acceptable accuracy after minimal training [15]. Another innovative methodology combined deep neural networks with inverse modeling to generate urban morphometric parameters, enhancing environmental assessments at the city scale [16]. One of the recent years' works demonstrated CNNs' ability to detect changes in urban sprawl using multi-source remote sensing data, achieving over 90% accuracy [17], and another publication within these years introduced deep learning for morphometric parameter extraction [18]. Recurrent Neural Networks (RNNs), particularly Long Short-Term Memory (LSTM) networks, have also been explored for their temporal modeling capabilities. Research integrating fully convolutional networks with RNNs has shown promise in capturing temporal dependencies in multitemporal Sentinel-2 data [19], with other authors extending this approach by combining LSTMs with attention mechanisms [20].

Integration of multisource data. The fusion of optical and Synthetic Aperture Radar (SAR) data has been a focal point in recent studies. A neural network-based framework was developed to detect urban changes using varying numbers of optical and SAR observations, addressing challenges posed by atmospheric effects and seasonal variations [21]. This multisource data integration enhances the robustness of change detection models, which has been increa-

singly explored in recent geospatial research. For instance, some authors proposed a hybrid ANN model combining SAR and LiDAR data to detect subtle urban changes [22], while others demonstrated multi-source fusion for urban monitoring [23].

Benchmark datasets and methodological innovations. The creation of benchmark datasets has been pivotal for advancing urban change detection methodologies. The *Hi-UCD dataset*, introduced in the recent years, comprises high-resolution aerial images with semantic annotations across multiple time phases [24]. Methodologically, the adoption of Siamese CNN architectures has facilitated the extraction of features from temporal image pairs [25], and transformer-based neural networks for improved feature extraction have been introduced recently [26]. Earlier surveys systematically reviewed change detection algorithms [27], while some advanced algorithmic solutions were proposed somewhat later, for instance - for continuous land cover classification [28].

Challenges and Future Directions. Despite significant progress, challenges persist in the field of urban morphology change detection. Accurately capturing complex urban features and addressing data quality issues remain areas for improvement [29]. Future research may be anticipated to focus on refining neural network architectures, enhancing data fusion techniques, and developing comprehensive benchmark datasets [30]. The development of real-time monitoring systems and integration with geospatial decision-making frameworks will likely be critical in shaping the next generation of urban remote sensing applications.

Exposition of the main research material. The basics of artificial neural networks for urban studies. *Constructed (Artificial) Neural Network (ANN)* is essentially a mathematical modeling technique based on the principles of organization and functioning of the human central nervous system, particularly those principles that implement human logic and the ability to solve a wide range of problems, for example, within the urban remote sensing domain [2, 8, 20, 25, 31]. The core content of this modeling technique is the emulation of biological neural networks and the creation of learning algorithms. These algorithms are used in tasks where the application of other logic or analytical techniques is problematic, such as in complex forecasting or pattern recognition tasks.

The ANN methodology differs from other computer modeling techniques primarily in that it *is not rule-based* and does not require a *predefined knowledge base*. An ANN model learns based on associative patterns to recognize and generalize relationships between sets of input and output parameters for modeling and analysis.

In this study we apply to those constructed neural networks, which possess a typical architecture that

includes the following main components: *network topology*, *learning paradigm*, and *learning algorithm*. The *network topology* defines its overall organization, the specifics of node connections, the direction of data flows, and error information between network layers. The *learning paradigm* determines the relationship between the two main learning algorithms that can be used: supervised learning and unsupervised learning.

Our algorithms of comparison employed further in this text have been primarily based on one of the most common ANN algorithms, which is the so-called *multi-layer topology algorithm*, in which all modeling elements (processing units) are organized into three key constituent layers: *input*, *hidden*, and *output* [32]. The *input layer* is designed to transmit predictive attribute data further to the *hidden layer*, which is connected to the *output layer*, where the final results are placed. Within this architecture, the simulated output layer is recursively compared with the desired output results until the delta between them (error signal) is minimized and the results of computer modeling begin to match the desired pattern.

While composing our relevant workflow, we also have taken into account probably the most suc-

cessful definition of the ANN basic principles, which has become a classic over the past two decades, was provided by three authors back in 2000 [33]. This expert believes that artificial neural networks are distributed, adaptive, nonlinear learning machines built from a variety of different elementary neural processors (PEs). Each PE in the network is connected to other processing elements and to itself. This *interconnectivity* defines the *network topology*, which is one of the foundations of its architecture. The information flows passing through the network nodes are scaled by parameters called *weights*, w_{ij} . The scaled information signals are summed as a collective contribution to the output layer of each PE in the network, and the output layer itself is a nonlinear (static) function. The output signal of each elementary neural processor either becomes part of the overall system output or is summed into the output signal of a neighboring cluster of PEs (i.e., several PEs). Thus, the *classical ANN architecture*, described above on the base of [32, 34], can be stylized, as we understand it, in the following way (Fig. 1).

Thus, seven key points described above due to the ANN-basics for urban studies can be summarized like follows:

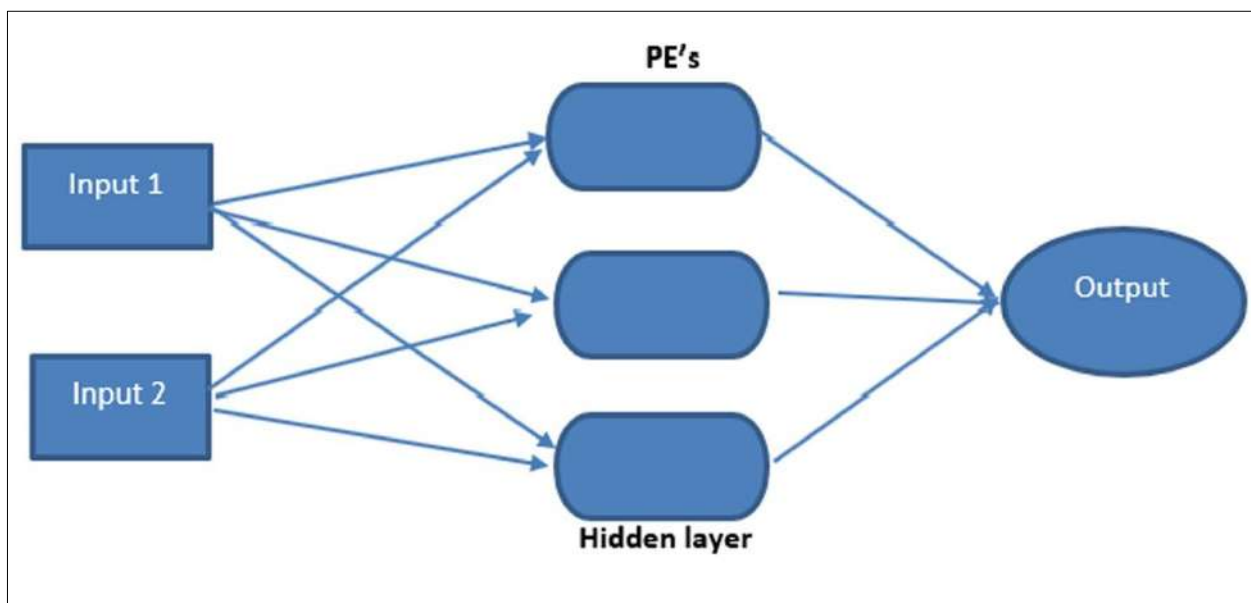


Fig. 1. The classical ANN architecture stylized according to the basics introduced in [32, 34]

1. *ANN as a Modeling Technique*: Based on principles of the human nervous system.
2. *Learning Algorithms*: Used for tasks like forecasting and pattern recognition.
3. *Distinctive Features*: Not rule-based, no predefined knowledge base, relies on associative learning.
4. *ANN Architecture*: Comprises topology, learning paradigm, and learning algorithm.
5. *Multi-Layer Topology*: Input, hidden, and output layers with recursive error minimization.
6. *Lefebvre's Definition* [33]: ANNs as distributed, adaptive, nonlinear learning machines.
7. *Interconnectivity and Weights*: Information flows are scaled by weights and summed for output.

Applications in urban studies. It is evident according to the basics introduced in the previous subsection, that ANNs can become instrumental in urban studies, offering advanced methodologies to analyze and interpret complex urban systems. ANNs, inspired by the human brain's neural architecture, consist of

interconnected nodes (neurons) that process information using adaptive weights. This structure enables them to model nonlinear relationships and patterns within data, making them particularly suitable for the multifaceted nature of urban environments, what is the premise for these three following applications feasible:

1. *Urban Growth Prediction:* ANNs have been employed to forecast urban expansion by analyzing socio-economic and geographic factors. For instance, a study in Mexico integrated ANNs with cellular automata to predict vertical urban growth, aiding urban planning decisions [34]. This model utilized spatial analysis and image processing to simulate various urban growth scenarios, demonstrating the capability of ANNs to handle complex urban dynamics.

2. *Urban Building Energy Modeling (UBEM):* In the quest for sustainable cities, ANNs have been applied to model energy consumption patterns in urban buildings. A notable example is the TEAC tool, developed for the Polish residential sector, which leverages ANNs to analyze energy usage [35]. This approach addresses the limitations of traditional UBEM tools by providing tailored analyses for specific urban contexts, thereby enhancing the accuracy of energy consumption predictions.

3. *Smart City Regulation:* The integration of ANNs in smart city frameworks has facilitated real-time monitoring and management of urban systems. One of the referred to research has highlighted the importance of using ANNs to regulate smart cities, ensuring the protection of civic rights, security, and privacy [36]. By processing vast amounts of data from various urban sensors, ANNs can identify patterns and anomalies, contributing to more responsive and adaptive urban management strategies.

Upon any development of a relevant workflow, it is mandatory to realize that despite their advantages, the application of ANNs in urban studies presents challenges. The quality and representativeness of input data are critical, as biases or inaccuracies can lead to flawed outcomes. Moreover, the *black-box* nature of ANNs raises concerns about interpretability, making it essential for urban planners and policymakers to understand the underlying mechanisms of these models. Addressing these challenges requires interdisciplinary collaboration, combining technical expertise with domain-specific knowledge to ensure that ANN applications in urban studies are both effective and trustworthy.

Thus, ANNs offer powerful tools for analyzing and managing urban systems. Their ability to model complex, nonlinear relationships makes them invaluable in various urban applications, from change detection for growth prediction to energy modeling and smart city regulation. As urban areas continue to evolve, the integration of ANNs in urban studies is

poised to play a pivotal role in shaping sustainable and resilient cities.

Urban remote sensing with LiDAR. Our research approach to the aforementioned issues aligns with the frameworks of Urban Remote Sensing utilizing LiDAR for digital city modeling [2, 5, 6, 9, 37]. In this paper the central to the approach is our concept of comparing various change detection datasets through ANN analysis.

LiDAR systems are broadly categorized into Airborne LiDAR Systems (ALS), deployed on aircraft, helicopters, or drones (UAVs), and Terrestrial LiDAR Systems (MLS), which are vehicle-based and mobile. While MLS techniques have recently gained prominence, their primary applications extend beyond building facade extraction to include urban road feature recognition [38] and infrastructure network feature extraction using combined ALS/MLS methods [39].

A critical challenge in automated feature extraction lies in establishing seamless integration between mobile LiDAR (MLS) and airborne LiDAR (ALS) datasets. This integration is essential for creating comprehensive 3D urban models. For instance, Figure 2 illustrates the results of a LiDAR project aimed at simulating downtown Ottawa at the end of the first decade of the millennium, based on data provided by the municipality. The author of this paper served as the project's research advisor. This example underscores the potential of combining ALS and MLS datasets for the extraction, recognition, and classification of geographical objects.

LiDAR data is particularly well-suited for simulating and visualizing urban environments through 3D city models. Most existing approaches focus on reconstructing roof and facade levels with varying degrees of accuracy, as depicted in Figure 2B.

These 3D models enable a wide range of highly efficient applications across 14-18 industrial domains, from urban planning to disaster management [4].

Case study: urban change detection using LiDAR to assess the hostilities' impact. *Methods and techniques of change detection.* The Change Detection (CD) technique leverages our high polyhedral modeling Building Extraction (BE) from LiDAR point clouds functionality [37] to automate the monitoring of architectural and geometric changes in urban environments over a specified time period. This is achieved by comparing and analyzing *two* LiDAR point clouds, enabling the identification of changes in the positions and shapes of buildings represented as 3D models. Our CD methodology addresses three fundamental tasks essential for accurate 3D change detection:

1. Coordinate system alignment,
2. Spatial and spectral comparison, and
3. Representation and analysis of detected changes.

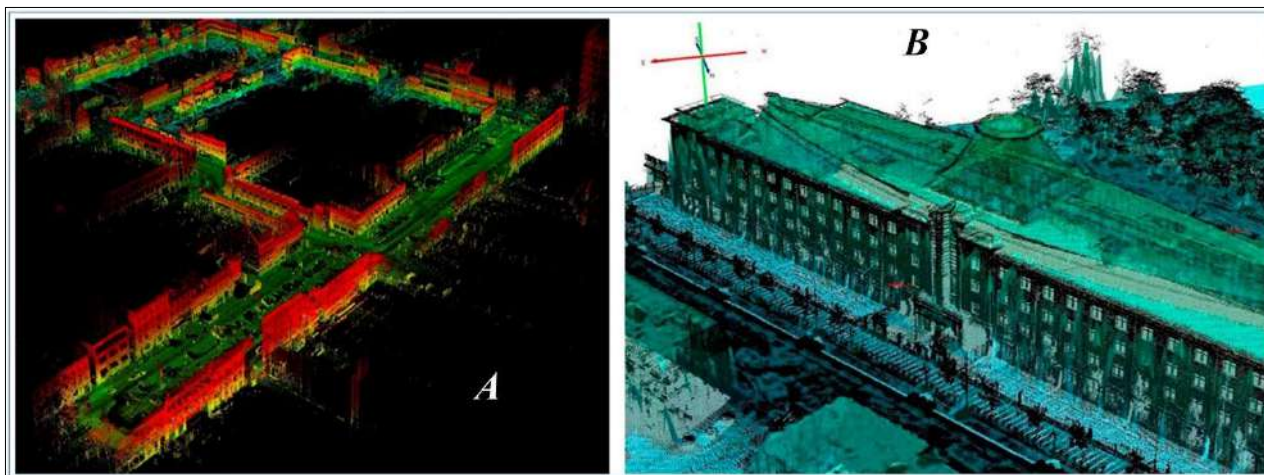


Fig. 2. *A* – ALS/MLS reconstruction of the route of President Obama's visit to Ottawa;
B – MLS-reconstructed facades of the Canadian parliament building.

Furthermore, our approach aligns with established urban change categorization frameworks, which classify changes into three primary categories: positive, negative, and no change, each with subcategories. In our study, the *Added* and *Removed* building change classes correspond to partial change cases, such as "new (part)" and "demolished (part)".

Our proposed CD solution overcomes these challenges by detecting differences between buildings extracted from multitemporal LiDAR Point Clouds aligned to the same geographic extent. Unlike traditional methods, which struggle to distinguish buildings with similar textures from other structures, our approach employs an effective thresholding technique to filter out insignificant changes.

To ensure the accuracy of detected changes, we differentiate between real changes and artifacts (caused by data errors). Artifacts are identified by analyzing point density: if a lot contains points from the *Primary* Point Cloud but none from the *Secondary* point cloud, it is flagged as an artifact. Conversely, real changes exhibit higher point density in the relevant cloud (*Secondary* for *Added* changes, *Primary* for *Removed* changes). This density threshold method effectively discriminates between artifacts and genuine changes.

Finally, the detected changes are classified into three categories:

1. *Unchanged* building lots,
2. *Added* lots (completely or partially covered by new construction), and
3. *Removed* lots (completely or partially demolished buildings).

These classifications are integrated into the *BE*-database, updating the status of buildings within the change detection framework. This approach not only enhances the accuracy of urban change detection but also provides a robust foundation for applications in urban planning, disaster recovery, and policy devel-

opment.

Desktop software. The proprietary *iQ City Change Management (CCM)* software, a desktop application for *Windows OS*, was developed under the leadership and primary contribution of the author as a non-commercial project without external funding. The software's algorithmic core was implemented using *C++* and *Python*, while the user interface was developed with *C# MS .NET*. Initially introduced in an academic publication detailing urban studies with LiDAR data processing in the Kharkiv region [5], the software underwent its latest update in 2019, with the algorithmic core adapted for *C++ 11* and *Python 3.7*.

The *CCM* software features an intuitive user interface. Upon launching, users can either access recently completed projects via *File => Recent Projects* or initiate a new project. For new projects, users configure parameters in the *Project Preferences* dialog, including selecting a projection system from the supported categories and adjusting additional settings under the *General* option. Once project setup is complete, raw *.LAS* files are imported for processing. Within the framework of high polyhedral modeling, users sequentially apply *BE* and *CD* functionalities. The *Workbench* menu provides access to the *Building Extraction Technology* tool (Fig. 3), which offers three options for detecting and extracting buildings. These options also identify changes in urban features, exporting results as *.OBJ* and *.ThreeDFM* files.

Initial LiDAR datasets and visualization of detected changes. The *Primary Kharkiv Northern Saltivka (KHNS)* dataset was collected by the surveying Company in June 2019 using a *Riegl VQ-1560 II-S* sensor mounted on a helicopter, covering a 68 sq. km urban area. A 4 sq. km test site within this area, containing approximately 122 million points, served as the focus for analysis. The raw ALS data was preprocessed using *Riegl RiProcess* software, with the resulting colored point clouds exported as *.LAS 1.4* files.

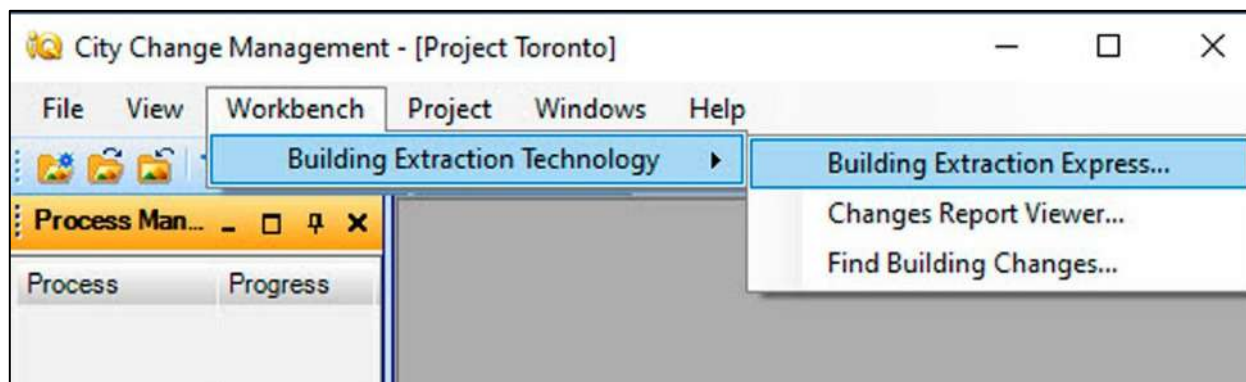


Fig. 3. *Workbench* menu in the *CCM* interface that starts BE and CD procedures consequently

Unlike previous work in North America, where preprocessed ALS/MLS datasets were provided by local authorities, this study faced the challenge of processing raw LiDAR data. While a helicopter was used for ALS data collection, attempts to gather MLS data for building facades using a land vehicle were unsuccessful. Despite advanced methods for combining ALS/MLS point clouds [40], a sustainable composite dataset for model calibration within the high polyhedral modeling workflow could not be achieved.

Following the cessation of violent conflicts in Kharkiv's outskirts in September 2022, the need for URS to support post-war recovery became a priority for local government, researchers, and NGOs. With permission from local authorities, our volunteer team conducted a second ALS survey in mid-November 2022 on exactly the mentioned above 4 sq. km but now deserted urban zone, using the same equipment and preprocessing software donated by the Company.

For comparative analysis we have sought for urban sites not struck by the hostilities, but faced a routine redevelopment. LiDAR data from two locations in Tallinn, Estonia, were obtained from the national geoportal [41]. Each of these locations was 4 sq. km too. The *Primary* surveys in December 2017 produced datasets *Estonia-1/Estonia-2* (*EST-1/EST-2*), approximately 80 million points each, with an average density of 20 points/sq. m. The *Secondary* surveys in December 2022 yielded 120 million points per dataset, with a density of 30 points/sq. m. While the *KHNS* dataset spans a 3-year change detection gap, the Tallinn datasets cover 5 years, posing potential accuracy challenges.

Thus, using ALS data from 2017 and 2022 for the *EST1* and *EST2* datasets, and from 2019 and 2022 for the *KHNS* dataset, we generated differences in BE models between primary and secondary segments using the described BE and CD techniques [9].

The areal distribution of detected changes for *EST1*, *EST2*, and *KHNS* was calibrated using additional repeated ALS datasets, as mentioned in Fig. 3 (Toronto project in a window caption of the *CCM*

interface). For the primary focus of this research, urban morphology changes in the *KHNS* site of Kharkiv were analyzed, including a visual comparison of CD areal distributions across the three key study sites (4 sq. km each) (Fig. 4-6). Detected changes were visualized alongside intact building models as *3D scenes*, providing a more representative depiction than simplified 2D schemes, particularly when outlining multiple types of building changes.

The footprints of extracted buildings, the centroids of CD features, and a topographic grid generated by *CCM* were exported to *QGIS* as raster layers and point/polygonal feature sets. While *CCM* could not visualize CD footprints for export, precise numerical values (**Area** - *A*, **Volume** - *V*, **Height** - *H*) of these features were computed and used to map CD centroids in this full format GIS - *QGIS*. Using *X*, *Y* coordinates from a *CCM*-generated .CSV file, the *Select by Location* tool in *QGIS* identified building footprints intersecting CD centroids. This approach enables users to detect changed buildings and create a separate CD layer with the key attributes mentioned (*A*, *V*, *H*) even without specialized software like *CCM*.

ANN analysis for comparing detected urban changes' datasets. Some introductory issues. Choosing three basic geometric change parameters (*Area*, *Volume*, and *Height*) for ANN analysis in *Wolfram Mathematica 13.2* is a logical approach to formalize data regularities and classify detected changes. The number of these changes, which determine derivative datasets, is like follows:

- ***EST-1***: 48 *Added* CD features and 67 *Removed* ones;
- ***EST-2***: 175 *Added* CD features and 174 *Removed*;
- ***KHNS***: 215 *Added* CD features and 51 *Removed*; all *Removed* CD objects in *KHNS* could be supposedly caused by the military impact only.

However, selecting an appropriate quantitative method posed challenges, as these data do not clearly belong to either natural or social science domains. To

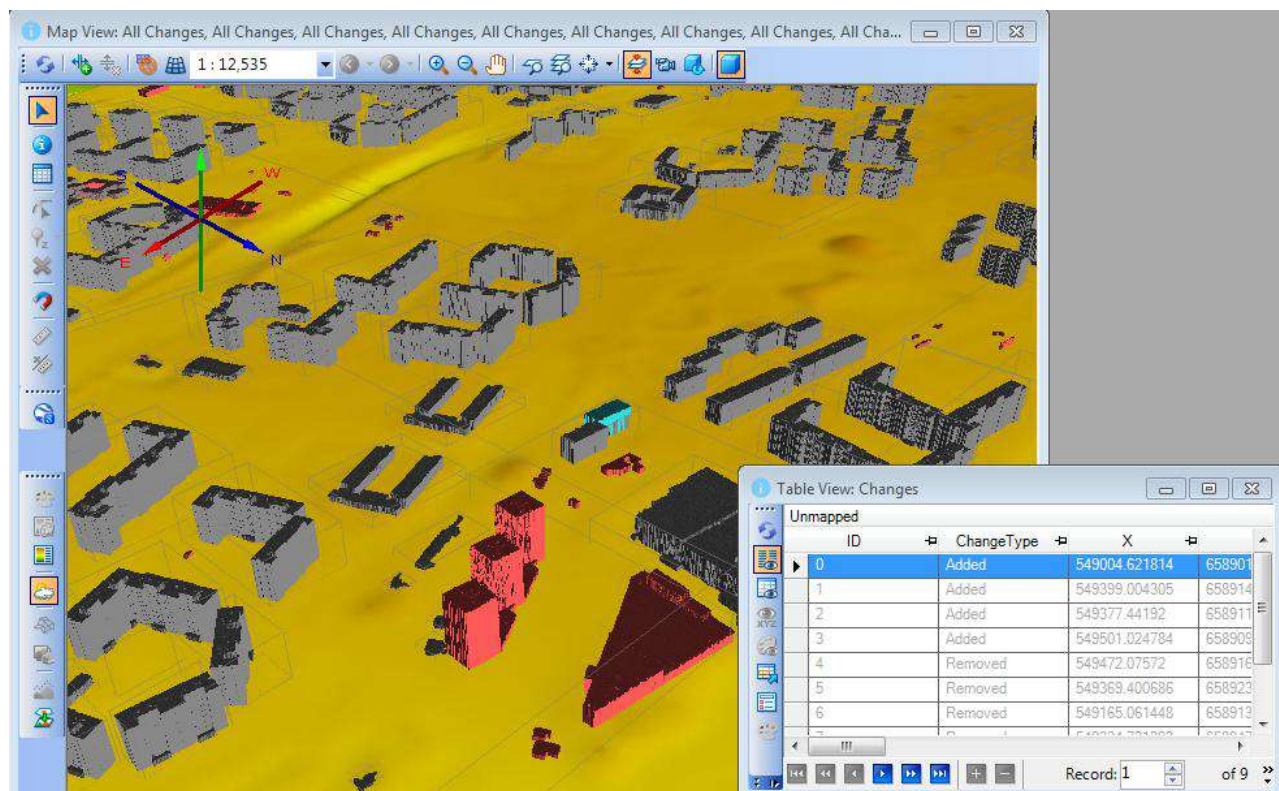


Fig. 4. Results of change detection in the CCM interface for the multitemporal (2017–2022) LiDAR dataset *EST1*: Lasnamäe city district, Tallinn. Detected changes in architectural morphology are highlighted in red

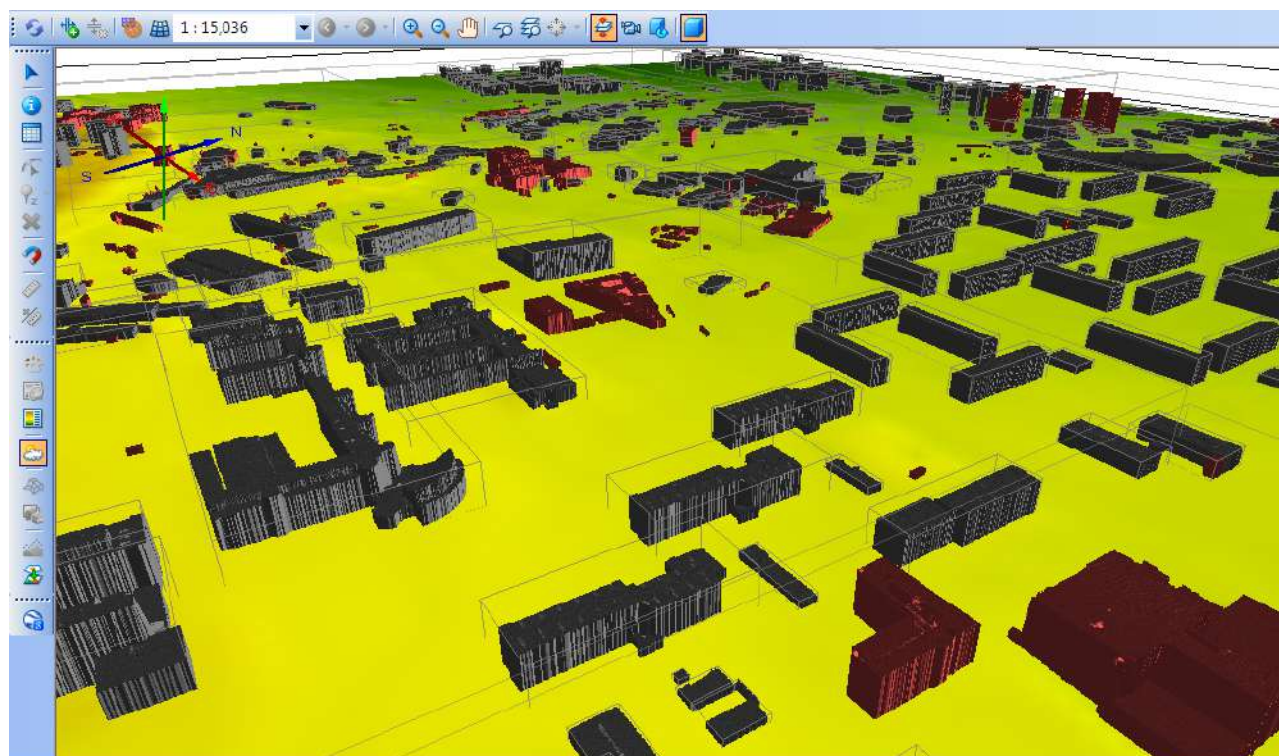


Fig. 5. Results of change detection in the CCM interface for the multitemporal (2017–2022) LiDAR dataset *EST2*: Mustamäe city district, Tallinn. Detected changes in architectural morphology are highlighted in red

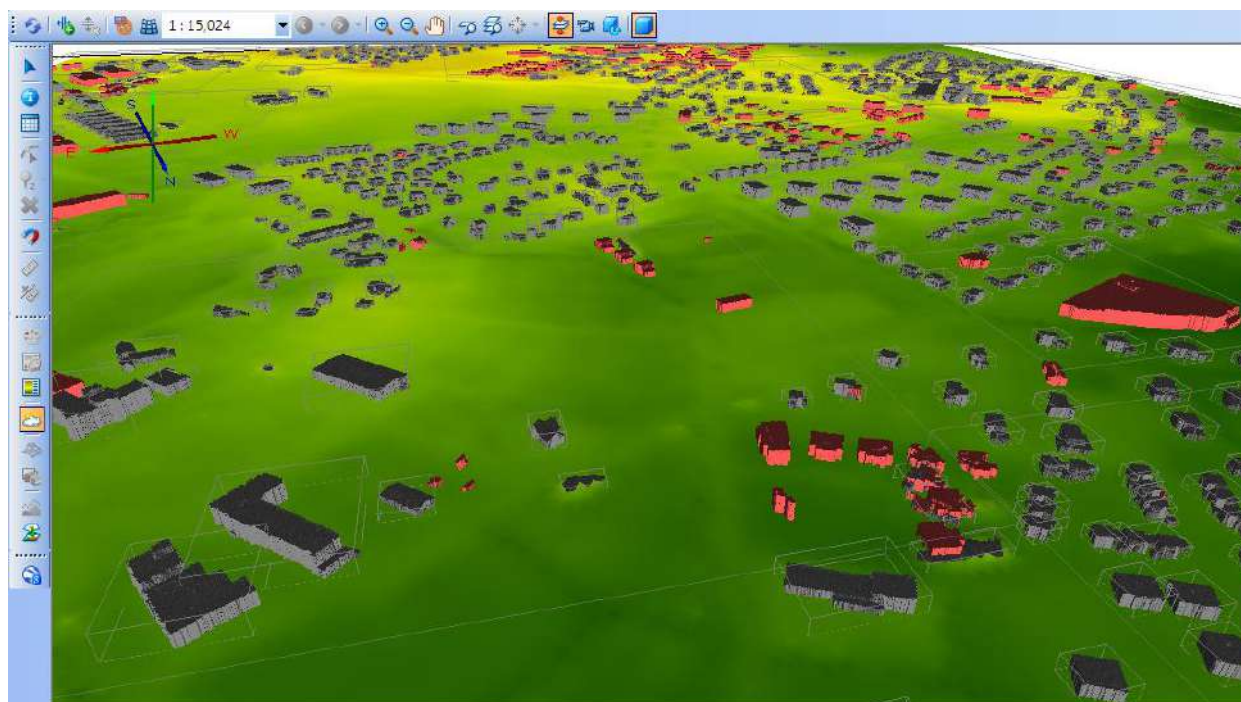


Fig. 6. Results of change detection in the CCM interface for the multitemporal (2019–2022) LiDAR dataset KHNS: Northern Saltivka city district, Kharkiv.
Detected changes in architectural morphology are highlighted in red

address this, we considered existing examples of statistical evaluation within the building change detection domain, such as approaches validating demolition statistics (e.g., the number and volume of demolished buildings) [42].

Our research ANN outline. Our ultimate task is to compare, through neural network analysis using Wolfram Language, the following datasets:

- Positive changes (class *Added*): $EST1n$, $EST2n$, $KHNSn$.
- Negative changes (class *Removed*): $EST1Rn$, $EST2Rn$, $KHNSRn$.

Each dataset consists of arrays of geometric objects with three columns representing *Area*, *Volume*, and *Height* (A , V , H) without explicit labels. We assigned:

- Labels 1, 2, and 3 to positive changes ($EST1n$, $EST2n$, $KHNSn$), corresponding to newly built buildings or their parts.
- Labels 4 and 5 to negative changes ($EST1Rn$, $EST2Rn$), corresponding to demolished buildings from normal urban redevelopment.
- Label 6 to negative changes ($KHNSRn$), corresponding to demolished buildings due to military hostilities.

We aim to compare the following pairs to identify differences or similarities:

1. Positive pairs: $EST1n$ with $EST2n$, $EST1n$ with $KHNSn$, $EST2n$ with $KHNSn$.
2. Negative pairs: $EST1Rn$ with $EST2Rn$, $EST1Rn$ with $KHNSRn$, $EST2Rn$ with $KHNSRn$.

For this purpose, we created paired datasets:

- Positive pairs: $pairsEST1nEST2n$, $pairsEST1nKHNSn$, $pairsEST2nKHNSn$.
- Negative pairs: $pairsEST1RnEST2Rn$, $pairsEST1RnKHNSRn$, $pairsEST2RnKHNSRn$.

Each pair provides a unique numerical value for "similar-dissimilar" comparison through binary classification. These six datasets serve as inputs, each containing pairs of values for comparison.

After loading and labeling the datasets, we generated six *adjusted* datasets:

- $adjustedTestSetEST1nEST2n$, $adjustedTestSetEST1nKHNSn$, $adjustedTestSetEST2nKHNSn$.
- $adjustedTestSetEST1RnEST2Rn$, $adjustedTestSetEST1RnKHNSRn$, $adjustedTestSetEST2RnKHNSRn$.

Using these adjusted datasets, we created *trainingData* and *validationData* variables, manually editing each dataset to ensure a consistent format of six features followed by one label. All datasets were saved as .CSV files in a specified directory.

Crucially, we incorporated insights from prior research based on statistical data and model analysis, which provided expected similarity/dissimilarity outcomes for the pairs [9], each of them forms the corresponding classes of the future comparison:

- $EST1n$ with $EST2n$: Expected to be similar, classes 1, 2 of the future comparison.
- $EST1n$ with $KHNSn$: Expected to be similar, classes 1-3.

- *EST2n* with *KHNSn*: Expected to be slightly dissimilar, classes 2-3.
- *EST1Rn* with *EST2Rn*: Expected to be similar, classes 4-5.
- *EST1Rn* with *KHNSRn*: Expected to be dissimilar, classes 4-6
- *EST2Rn* with *KHNSRn*: Expected to be marginally dissimilar, classes 5-6.

Workflow for comparing datasets using neural networks. To achieve the goal of comparing six pairs of datasets and obtaining a unique numerical value indicating their similarity or dissimilarity, the following workflow was implemented:

Step 1: Data Preparation:

1. Load Datasets: Ensure all six datasets are properly loaded and formatted. Each dataset should consist of six features (representing geometric parameters: *Area*, *Volume*, and *Height*) followed by one label (indicating the class of change).
2. Data Formatting: Verify that the datasets are structured consistently, with each row containing six feature values and a corresponding label. Save the datasets as *.CSV* files for compatibility with the neural network framework.

Step 2: Neural Network Training:

1. Model Design: Train a neural network for each pair of datasets to perform binary classification, distinguishing between similar and dissimilar pairs.
2. Training Process: Use the prepared datasets to train the neural network, ensuring that the model learns to accurately classify the pairs based on their geometric features.

Step 3: Model Evaluation and Similarity Scoring:

1. Model Evaluation: Evaluate the trained neural network models using validation datasets to determine their classification accuracy.
2. Similarity Scores: Use the accuracy scores as indicators of similarity or dissimilarity. Higher accuracy suggests greater similarity (indicating the model can easily classify the pair as similar), while lower accuracy suggests greater dissimilarity (indicating the model struggles to classify the pair as similar).
3. Aggregate Measure: Calculate a *totalAccuracy* metric to provide a combined measure of similarity/dissimilarity across all pairs.

Interpretation of Results

- Unique Numerical Values: The accuracy scores for each pair serve as unique numerical values quantifying their similarity or dissimilarity.
- Comparative Analysis: *Higher accuracy* values indicate *greater similarity* between datasets, while *lower* values indicate *greater*

dissimilarity. This approach enables a systematic comparison of urban change datasets, providing insights into their underlying patterns and relationships.

By following this workflow, unique numerical values (accuracy scores) are obtained for each pair of datasets, facilitating a robust analysis of their similarities and differences based on neural network classification.

Proposed methodology for multi-class neural network analysis, neural network architecture, and its implemented classification. Taking into account all stated above so that to address the task of comparing urban morphology datasets, the following finally approach is proposed:

1. *Label Definition*: the datasets are labeled as 1, 2, and 3 for positive changes (e.g., newly constructed buildings) and 4, 5, and 6 for negative changes (e.g., demolished buildings). The neural network must output probabilities or scores corresponding to these labels, enabling precise classification of urban changes.
2. *Network Architecture Adjustment*: the neural network architecture is modified to accommodate multi-class classification. Specifically, the output layer is expanded to include 6 neurons, each representing one of the defined labels. A *Softmax activation function* is applied to ensure that the output probabilities sum to 1, facilitating interpretable class predictions.
3. *Training Process*: the network is trained using the labeled datasets. A *categorical cross-entropy loss function* is employed to optimize the model for multi-class classification, alongside an appropriate optimizer (e.g., Adam) to ensure efficient convergence.
4. *Model Evaluation*: the trained network is evaluated using the adjusted test sets (e.g., *adjustedTestSetEST1nEST2n*). Performance metrics such as *accuracy*, *precision*, *recall*, and *F1-score* are calculated to assess the model's ability to correctly classify urban changes.
5. *Dataset Comparison*: the trained network is applied to predict similarities and differences between paired datasets (e.g., *EST1n* with *EST2n*). The predictions are analyzed to identify patterns of similarity or dissimilarity, providing insights into the nature of urban changes across different contexts.

This finalized methodology ensures a robust and interpretable framework for analyzing urban morphology changes, leveraging the strengths of neural networks to automate and enhance the classification process.

The neural network developed in *Wolfram Mathematica* interface employs a *sequential architecture* designed to process multi-dimensional urban mor-

phology data, such as LiDAR-derived geometric features (e.g., building footprints, heights, or volumetric changes) [Fig. 7]. The architecture is structured as follows:

1. *Input Layer*: accepts 3D data arrays (size: $67 \times 2 \times 3$), representing spatial and temporal features of urban changes.
2. *Flatten Layer*: converts the input into a 1D vector (size: 420) for compatibility with subsequent layers.
3. *Hidden Layers*: A series of linear layers interspersed with *ReLU* (Ramp) activation func-

tions progressively reduce dimensionality ($100 \rightarrow 50 \rightarrow 10$ nodes), enabling hierarchical feature extraction.

4. *Output Layer*: A final linear layer maps the extracted features to a scalar output (size: 1), which quantifies detected changes (e.g., similarity scores or regression targets).

This architecture is optimized for *binary classification* or regression tasks, such as distinguishing between routine urban redevelopment and war-(conflict-) induced disruptions. The use of *ReLU* activations ensures non-linear modeling capabilities, criti-

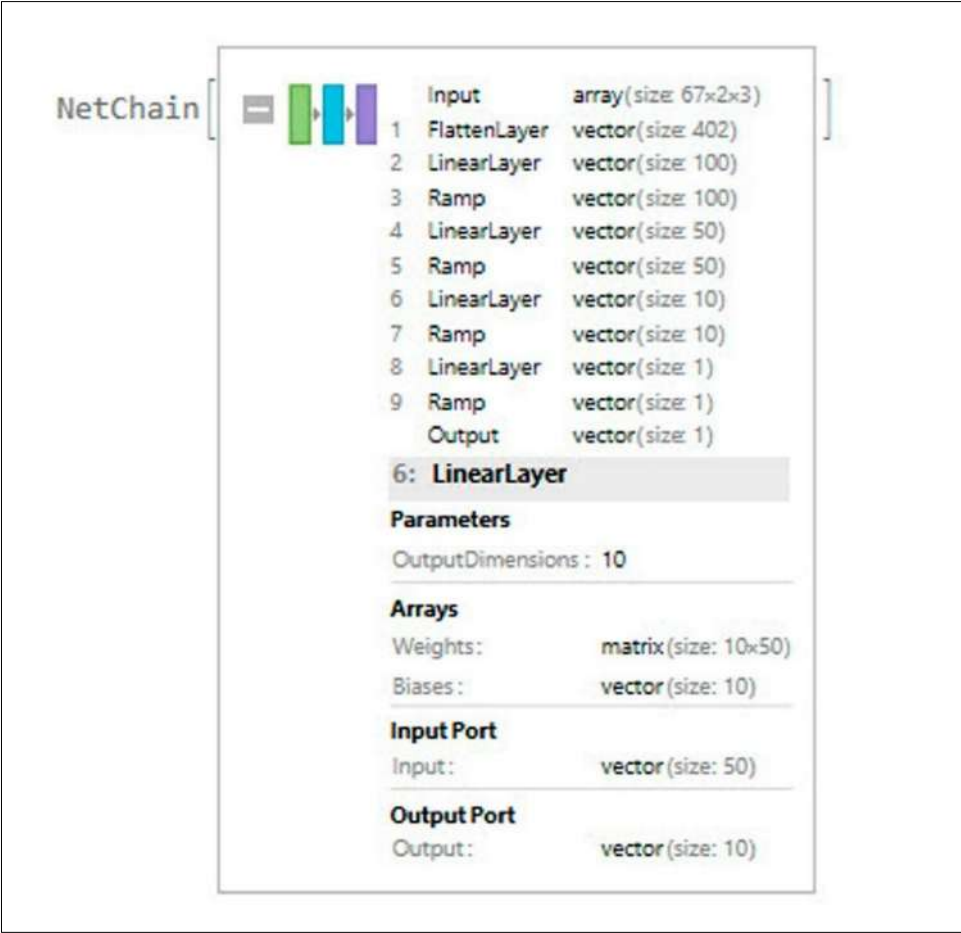


Fig. 7. Neural network architecture for urban morphology analysis: the *Wolfram Mathematica 13.2* interface

cal for capturing complex urban patterns. Its relevance to urban morphology lies in the following:

- *Input Flexibility*: the 3D input structure aligns with LiDAR point cloud data, facilitating analysis of volumetric changes (e.g., demolished or reconstructed buildings).
- *Scalability*: the network’s progressive dimensionality reduction enables efficient processing of large-scale urban datasets.
- *Interpretability*: outputs (e.g., *similarity scores*) provide actionable insights for urban planners, such as identifying zones requiring post-war (conflict) recovery.

This framework underscores the potential of ne-

ural networks to automate and enhance urban change detection, bridging gaps in traditional GIS-based methods.

The following illustrated table represents an implementation of a neural network-based classification system for analyzing urban morphology changes (Fig. 8). The structure showcases a comparison of image pairs processed using a *Siamese Neural Network* framework, where features are extracted via a *NetChain* model.

The output predictions are numerical values that are subsequently thresholded (≥ 0.5) to classify pairs as either “*Similar*” or “*Dissimilar*”.

Two latest illustrations are closely linked in that

Figure 7 shows the *neural network architecture* (the *NetChain*), while Figure 8 displays the *classification results* generated by that very architecture. Specifically, the table in Figure 7 illustrates how each pair of inputs mentioned above is processed by the *NetChain*, producing a numeric “Prediction” that is thresholded to classify pairs as either “Similar” or “Dissimilar.” Meanwhile, Figure 7 provides a sche-

matic breakdown of the layers within the *NetChain - FlattenLayer, LinearLayer, Ramp*, and so on—indicating how the input data flows through the network to arrive at those classification outputs. Thus, the two figures together depict both the *structure* of the neural model (Fig. 7) and the *outcomes* it yields when applied to pairs of urban morphology data (Fig. 8).

(=Display the results in a table=)

```
TableForm[results, TableHeadings -> {None, {"Pairs", "Prediction", "Classification"}}]
```

"Pairs"	"Prediction"	"Classification"
"pairsEST1nEST2n"	NetChain [ Input port: array (size: 67x2x3) Output port: vector (size: 1)]	If [NetChain [ Input port: array (size: 67x2x3) Output port: vector (size: 1)] ≥ 0.5 , "Similar", "Dissimilar"]
"pairsEST1nKHNSn"	NetChain [ Input port: array (size: 67x2x3) Output port: vector (size: 1)]	If [NetChain [ Input port: array (size: 67x2x3) Output port: vector (size: 1)] ≥ 0.5 , "Similar", "Dissimilar"]
"pairsEST2nKHNSn"	NetChain [ Input port: array (size: 67x2x3) Output port: vector (size: 1)]	If [NetChain [ Input port: array (size: 67x2x3) Output port: vector (size: 1)] ≥ 0.5 , "Similar", "Dissimilar"]
"pairsEST1RnEST2Rn"	NetChain [ Input port: array (size: 67x2x3) Output port: vector (size: 1)]	If [NetChain [ Input port: array (size: 67x2x3) Output port: vector (size: 1)] ≥ 0.5 , "Similar", "Dissimilar"]
"pairsEST1RnKHNSRn"	NetChain [ Input port: array (size: 67x2x3) Output port: vector (size: 1)]	If [NetChain [ Input port: array (size: 67x2x3) Output port: vector (size: 1)] ≥ 0.5 , "Similar", "Dissimilar"]
"pairsEST2RnKHNSRn"	NetChain [ Input port: array (size: 67x2x3) Output port: vector (size: 1)]	If [NetChain [ Input port: array (size: 67x2x3) Output port: vector (size: 1)] ≥ 0.5 , "Dissimilar", "Similar"]

Fig. 8. Neural network-based classification scheme for analyzing urban morphology:
the *Wolfram Mathematica 13.2* interface

In the context of urban morphology CD, this approach allows automated identification of structural modifications over time. The table suggests that the system is trained to compare spatial and spectral differences in urban point cloud, which is crucial for detecting new developments, demolitions, or transformations in the built environment. We can suppose that this developed methodology may be particularly valuable when working with the variety of sources: high-resolution satellite imagery, LiDAR datasets, or UAV-based urban monitoring systems [43, 44]. The table format indicates a structured workflow where each pair undergoes feature extraction and similarity assessment, demonstrating the robustness of artificial neural networks in spatial-temporal analysis. For future improvements, integrating transformer-based architectures or hybrid deep learning models could enhance feature extraction capabilities, improving accuracy in detecting subtle urban changes.

Two different ANN analysis methods built on the presented network architecture and classification scheme. The previously discussed ANN architecture (and its relevant classification scheme) is our developed variation of a standard feedforward neural network (FNN) with input, hidden, and output layers using *ReLU* and sigmoid activations [45]. It served as the foundation for two new ANN analysis methods elaborated one by one. The so-called *ANN Similarity (Enhanced)* (ANSE) method builds directly on this

architecture, retaining the FNN structure but refining its application to similarity tasks. It employs a Mean Squared Error (MSE) loss for training and computes similarity scores using cosine similarity, ideal for matching dataset pairs. In contrast, the *Latest ANN* (LANN) method extends the architecture significantly by incorporating deeper layers, advanced components like convolutional/recurrent layers (for spatial or sequential data), and activation variants such as *Leaky ReLU*. This method shifts focus to dissimilarity measurement, leveraging contrastive loss with a margin hyperparameter and Euclidean distance for embeddings. While the ANSE-method prioritizes straightforward similarity scoring, the LANN-method emphasizes complex data handling and dissimilarity optimization, making it suitable for tasks requiring nuanced differentiation. Both methods inherit core principles from the original FNN but diverge in complexity, loss functions, and application goals - ANSE for simplicity and similarity, LANN for depth and dissimilarity-driven scenarios.

Previously key premises of these two methods have been illustrated (Fig. 7 and Fig. 8). Figure 7 displays a schematic of the *NetChain* architecture itself. Here, the network is shown to include multiple layers - *FlattenLayer, LinearLayer, Ramp* (activation) layers, and an *Output* layer. This design corresponds to the backbone of the ANSE approach, where a MSE or other standard loss function (such as cross-

entropy) could be used to train the model on labeled pairs. In this configuration, the network's primary objective is to minimize the difference between predicted and actual similarity scores, thereby honing its ability to distinguish between similar and dissimilar inputs.

Meanwhile, Figure 8 shows, as it was already mentioned above, a table of classification results generated by a trained *NetChain* model. This table indicates whether pairs of datasets (e.g., image pairs) are predicted as "Similar" or "Dissimilar." The predictions are numerical outputs that are then thresholded at a predefined value (0.5 in this example). When the output exceeds this threshold, the pair is classified as "Similar," and otherwise as "Dissimilar." This table effectively demonstrates how the ANSE-method processes inputs to yield discrete similarity judgments.

Building on these foundations, the LANN-method modifies certain aspects of the architecture and loss function to emphasize dissimilarity more explicitly. For instance, the margin-based contrastive loss described in the accompanying text highlights how the network can measure the distance between embeddings of two datasets, such as images or LiDAR point clouds. This distance-driven approach can be particularly advantageous when the goal is to detect subtle changes or anomalies, as it focuses on capturing dissimilar features. The Latest ANN method may also incorporate additional layers, such as convolutional or recurrent layers, to handle more complex data structures.

There is formalized content of these two methods to be compared in two following subsections.

Formalized content of the ANSE-method.

Its ANN architecture:

This method typically uses a feedforward neural network (FNN) with multiple layers. The architecture includes:

- *Input Layer:* $X=[x_1, x_2, ..., x_n]$, where x_i represents features from the dataset;
- *Hidden Layers:* These layers transform the input data using activation functions.
- *Output Layer:* Produces the final prediction or similarity score.

Forward propagation:

The neural network processes the input through each layer. For a single layer l :

1. *Linear transformation:*

$$Z^{(l)} = W^{(l)} \times A^{(l-1)} + b^{(l)}, \quad (1)$$

where: $W^{(l)}$ is the weight matrix for layer l ; $A^{(l-1)}$ is the activation from the previous layer; $b^{(l)}$ is the bias term.

2. *Activation function:* a common choice is the *ReLU (Rectified Linear Unit)*:

$$A^{(l)} = \text{ReLU}(Z^{(l)}) = \max(0, Z^{(l)}), \quad (2)$$

For the output layer, the activation could be a sigmoid function if the task is binary classification:

$$\bar{y} = \delta(Z^{(l)}) = \frac{1}{1+e^{-Z^{(l)}}}. \quad (3)$$

Loss Function:

The loss function measures the difference between the predicted output $\bar{y}$ and the actual output y . For similarity, a common choice is MSE:

$$L = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\bar{y}_i - y_i)^2, \quad (4)$$

where m is the number of examples in the dataset.

Optimization:

The network minimizes the loss function using an optimization algorithm such as *Stochastic Gradient Descent (SGD)*:

$$W^{(l)} := W^{(l)} - \alpha \times \frac{\partial L}{\partial W^{(l)}}, \quad (5)$$

where α is the learning rate; $\frac{\partial L}{\partial W^{(l)}}$ is the gradient of the loss with respects to the weights.

Similarity measurement:

After training, the network outputs similarity scores for dataset pairs. These scores may be compared using *cosine similarity*:

$$\text{Cosine Similarity}(A, B) = \frac{A \times B}{\|A\| \|B\|}, \quad (6)$$

where A and B are the output vectors for two datasets.

Thus, expressions (1)-(6) represent the formalized framework of the ANSE-method, which combines regression-based learning with neural feature transformation, enhancing the model's ability to capture nuanced relationships in the data. However, the obtained results of the classification comparison did not align with the derivatives of the statistical analysis from [9]. Consequently, we developed some alternative method to address this discrepancy.

Formalized content of the LANN-method. Its ANN architecture:

The second developed method could involve a more complex neural network architecture, possibly incorporating deeper layers, different types of layers (e.g., convolutional or recurrent layers), or additional regularization techniques.

Forward Propagation:

Similar to the ANSE method, but the architecture might include more sophisticated components:

1. *Deeper Network:* more layers with the same forward propagation equations:

$$Z^{(l)} = W^{(l)} \times A^{(l-1)} + b^{(l)}, \quad (7)$$

$$A^{(l)} = \text{ReLU}(Z^{(l)}), \quad (8)$$

where $Z^{(l)}$ - output feature map of layer l after linear transformation; $W^{(l)}$ - Kernel/filter matrix (learnable weights) that detects spatial patterns (e.g., edges, textures); $A^{(l-1)}$ - the input activation map from the

previous layer (or raw input data for the first layer); $b^{(l)}$: *Bias term* added to each element of the output feature map.

Alternative activations like *Leaky ReLU*:

$$\text{Leaky ReLU}(Z^{(l)}) = \max(0.01Z^{(l)}, Z^{(l)}), \quad (9)$$

2. Advanced Layers:

- *Convolutional Layers* (if used for spatial data):

$$Z^{(l)} = W^{(l)} * A^{(l-1)} + b^{(l)}, \quad (10)$$

where $*$ denotes the convolution operation, where the kernel slides over $A^{(l-1)}$ to compute dot products at each spatial location.

- *Recurrent Layers* (if used):

$$h_t = \tanh(W_h \times h_{t-1} + W_x \times x_t + b), \quad (11)$$

where h_t – hidden state at time step t ; h_{t-1} – hidden state from the previous time step; x_t – input at time step t ; W_x – weight matrix for the input; b – bias term; *tanh*: hyperbolic tangent activation function (common in RNNs).

Loss Function:

In this method, the loss function could be designed to emphasize *dissimilarity*. One possible choice is *Contrastive Loss*:

$$L = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_i \times D^2 + (1 - y_i) \times \max(0, \text{margin} - D)^2, \quad (12)$$

where D is the Euclidean distance between the output embeddings of the dataset pairs; *margin* is a hyperparameter defining the margin for dissimilarity.

Optimization:

The network parameters are optimized using similar techniques, such as *SGD* as in (5) or *Adam* optimizer:

$$W^{(l)} := W^{(l)} - \alpha \times \frac{\partial L}{\partial W^{(l)}}. \quad (13)$$

The gradients are calculated based on the chosen loss function.

Dissimilarity Measurement:

The final score reflects *dissimilarity*, which could be derived from the contrastive loss or another metric like *Euclidean distance* between the output vectors:

$$D(A, B) = \|A - B\|, \quad (14)$$

where A and B are the output vectors for two datasets.

The formalized content of the LANN-method represents by expressions (7)-(14) *dissimilarity-driven learning*, leveraging specialized architectures and loss functions to distinguish complex or structured data (e.g., images, sequences), contrasting with the earlier similarity-focused regression approach implemented in the ANSE-method.

Results of datasets' analytical comparison.

Thus, it would be reasonable to emphasize once again, that the essence of our *ANN Similarity (Enhanced)* method lies in using a feedforward neural network to predict similarity scores between dataset pairs, while the essence of the *Latest ANN Method* lies in its focus on *learning dissimilarity* between dataset pairs using a more complex architecture and specialized loss functions.

We integrated the latest score values from our Wolfram code output into the following analysis. These scores represent another from [9] dimension of comparison, reflecting the similarity or dissimilarity between the dataset pairs based on the two methods introduced above in details. We used the same nominal classes of pairs designated in the *Our research outline* subsection and obtained the following results in the *Wolfram Mathematica* interface due to the LANN-method. These pairs' classes have been titled with the following thematic content (Fig. 9):

The comparative analysis of the scores obtained from both methods is like follows:

Final Results:			
Classes	Relationship	Score	Interpretation
Out[62]=	1-2 New Developments Similarity	0.66	Moderate Similarity
	1-3 New-Heritage Comparison	0.60	Moderate Similarity
	2-3 New Development Dissimilarity	0.35	Different Characteristics
	4-5 Demolition Pattern Similarity	0.74	Moderate Similarity
	4-6 Conflict Zone Contrast	0.32	Different Characteristics
	5-6 Demolition Type Differentiation	0.42	Different Characteristics

Fig. 9. Similarity-Dissimilarity scores of urban morphology changes according to the LANN-method: the *Wolfram Mathematica 13.2* interface

1. *EST1n vs. EST2n – New Developments Similarity* pair class:
 - *ANN Similarity (Enhanced)*: 0.894851 (High Similarity);

- *Latest ANN method score*: 0.664566 (Moderate Similarity through Dissimilarity measures);

Analysis: The low dissimilarity score from the

LANN-method indicates that the datasets are very similar in the context of the that approach. This aligns with the high similarity detected by the first method.

2. *EST1n* vs. *KHNSn* – New-Heritage Comparison pair class:

- *ANN Similarity (Enhanced)*: 0.522459 (Moderate Similarity);
- *Latest ANN method score*: **0.606253** (Moderate Similarity through Dissimilarity measures);

Analysis: Similar to *EST1n* vs. *EST2n*, the LANN method reveals a low dissimilarity score, suggesting significant underlying similarity. This low dissimilarity might indicate that the datasets share certain trends or patterns, possibly related to specific features that the ANN captures.

3. *EST2n* vs. *KHNSn* – New Development Dissimilarity pair class:

- *ANN Similarity (Enhanced)*: 0.821002 (High Similarity);
- *Latest ANN method score*: **0.351065** (Different Characteristics – Moderate Dissimilarity through Dissimilarity measures)

Analysis: The moderate dissimilarity score from the latest method suggests that *EST2n* and *KHNSn* are relatively dissimilar, what correspond to our preliminary research [9]. This dissimilarity could be attributed to the datasets sharing patterns or structural features that are difficult to detect using the ANSE-method alone, and this method does not work for this pair class.

4. *EST1Rn* vs. *EST2Rn* – Demolition Pattern Similarity pair class:

- *ANN Similarity (Enhanced)*: 0.854478 (High Similarity);
- *Latest ANN method score*: **0.743335** (Moderate Similarity through Dissimilarity measures);

Analysis: Both methods actually indicate perfect similarity between *EST1Rn* and *EST2Rn* – datasets of negative changes in Tallin, fully aligning with the high similarity observed in both the statistical analysis [9], and in the ANN analysis for positive changes (see above). This confirms that the datasets are indeed highly similar, both structurally and in underlying patterns.

5. *EST1Rn* vs. *KHNSRn* – War (Conflict) Zone Contrast pair class:

- *ANN Similarity (Enhanced)*: 0.499366 (Low Similarity);
- *Latest ANN method score*: **0.329077** (Different Characteristics – Moderate Dissimilarity through Dissimilarity measures);

Analysis: The ANSE-score suggests low similarity, in contrast to the moderate dissimilarity from the latest method. This result might indicate that while the datasets differ in magnitude and simpler

metrics, because their demolished changes caused by urban redevelopment in one case, and by military hostilities in another one, they may share deeper, complex features detectable by both methods (Low Similarity; Moderate, but not High Dissimilarity).

6. *EST2Rn* vs. *KHNSRn* – Demolition Type Differentiation pair class:

- *ANN Similarity (Enhanced)*: 0.480926 (Low Similarity);
- *Latest ANN Method Score*: **0.424677** (Moderate to Low Dissimilarity through Dissimilarity measures)

Analysis: The score of 0.424677 from the second methods reflects moderate to low dissimilarity, generally consistent with the moderate similarity observed by the first method. This suggests that while there are some similarities between *EST2Rn* (demolished changes upon a normal urban redevelopment) and *KHNSRn* (demolished changes caused by military hostilities), they still exhibit notable differences, particularly in structural and complex patterns. It is necessary to mentioned that most significant differences among all pairs were expected exactly for this Sixth class according to the statistical analysis results [9], but it appeared not to be a case.

After the analysis provided, we should finalize the matter by comparing expected results for the nominal classes of pairs from the *Our research outline* subsection and the LANN-method results (Fig. 9), which align *partially* with the expected similarity/dissimilarity outcomes from prior research [9], with notable deviations in two cases:

1. Aligned Expectations:

- Classes 1–2 (*EST1n* vs. *EST2n*):
 - Score: **0.66** (Moderate Similarity);
 - Matches the expectation of *similar*.
- Classes 1–3 (*EST1n* vs. *KHNSn*):
 - Score: **0.60** (Moderate Similarity);
 - Consistent with the *similar* expectation.
- Classes 4–5 (*EST1Rn* vs. *EST2Rn*):
 - Score: **0.74** (Moderate Similarity);
 - Strong agreement with the *similar* expectation.
- Classes 4–6 (*EST1Rn* vs. *KHNSRn*):
 - Score: **0.32** (Different Characteristics);
 - Matches the *dissimilar* expectation.

2. Deviations:

- Classes 2–3 (*EST2n* vs. *KHNSn*):
 - Score: **0.35** (Different Characteristics);
 - Expected *slightly dissimilar*, but LANN indicates stronger dissimilarity.
- Classes 5–6 (*EST2Rn* vs. *KHNSRn*):
 - Score: **0.42** (Different Characteristics);
 - Expected *marginally dissimilar*, but LANN suggests intermediate dissimilarity.

Implications:

- The LANN method *overestimates dissimilarity* in classes 2–3 and 5–6 compared to statistical expectations (Fig. 9). This could reflect:
 - *Enhanced sensitivity* of the LANN to subtle feature differences (e.g., spatial or sequential patterns);
 - *Architectural bias* (e.g., deeper layers capturing non-linear relationships ignored by prior statistical models).
- Results for classes 1–2, 1–3, 4–5, and 4–6 validate the LANN's ability to replicate expected relationships.

Thus, the Latest ANN method successfully identifies core similarities/dissimilarities aligned with prior research but highlights additional granularity in dissimilar cases, potentially uncovering latent patterns missed by statistical analysis. Further investigation into the ANN feature representations (e.g., activation maps) could clarify these discrepancies.

Conclusion. Our study advances urban morphology analysis by integrating neural networks with LiDAR and GIS technologies to detect both routine urban redevelopments and disruptions caused by extraordinary events, such as armed hostilities. Focusing on Kharkiv, Ukraine - a city severely impacted by the 2022 Russian invasion - the research introduces two novel neural network methods: the *ANN Similarity (Enhanced)* (ANSE) and the *Latest ANN* (LANN). The ANSE method employs a feedforward architect-

ture with MSE loss and cosine similarity to predict similarity scores, while the LANN method utilizes deeper networks, contrastive loss, and Euclidean distance to emphasize dissimilarity, capturing nuanced spatial-temporal patterns.

Key findings reveal that the LANN method aligns with prior statistical expectations for most dataset pairs (e.g., routine redevelopment demolitions in Tallinn), demonstrating high accuracy in distinguishing similarity (scores 0.60–0.74). However, it overestimates dissimilarity in hostilities-related cases (e.g., Kharkiv war-induced demolitions), suggesting enhanced sensitivity to latent features like structural degradation or irregular redevelopment. These deviations highlight neural networks' capacity to uncover granular patterns overlooked by traditional models.

The framework's practical implications are quite significant: it may equip urban planners with scalable tools for monitoring post-war / post-disaster recovery, illegal encroachments, and ecological shifts. By automating 3D change detection, the methodology bridges gaps in conventional GIS-based approaches, offering actionable insights for equitable resource allocation and policy formulation. Future work should refine architectures (e.g., hybrid transformer-CNN models) and expand benchmark datasets to enhance generalizability. Ultimately, this research underscores AI's transformative role in fostering resilient, sustainable cities amid rapid urbanization and global crises.

References

1. United Nations. (2018). 68% of the World Population Projected to live in Urban Areas by 2050, Says UN. Department of Economic and Social Affairs. Available at: <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html>
2. Weng O. (2012). Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends. *Remote Sensing of Environment*. 117, 34-39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.030>.
3. 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>
4. Biljecki F., Stoter J., Ledoux H., Zlatanova S., Çöltekin A. (2015). Applications of 3D City Models: State of the Art Review. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 4, 2842–2889. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi4042842>
5. 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>
6. 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>
7. Efe R., Onay T., Sharuno I., Atasoy E. (Editors.) (2014). *Urban and Urbanization*. Sofia: St. Kliment Ohridski University Press, 798.
8. Li Z., Chen B., Wu S., Su M., Chen J., Xu B. (2024). Deep learning for urban land use category classification: A review and experimental assessment. *Remote Sensing of Environment*. 311, 114290. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114290>
9. 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
10. Gong P., Howarth P. J. (1992). Frequency-based contextual classification and gray-level vector reduction for land-use identification. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 58(4), 423-437.

11. Gopal S., Woodcock C. E. (1996). Remote sensing of forest change using artificial neural networks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 34(2), 398-404. DOI: <https://doi.org/10.1109/36.485117>.
12. Mas J. F. (1999). Monitoring land-cover changes: A comparison of change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*. 20(1), 139-152. DOI: <https://doi.org/10.1080/014311699213659>
13. Pijanowski B.C., Brown D.G., Shellito B.A., Manik G.A. (2002). Using neural networks and GIS to forecast land use changes: a Land Transformation Model. *Computers, Environment and Urban Systems*. 26 (6), 553-575. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0198-9715\(01\)00015-1](https://doi.org/10.1016/S0198-9715(01)00015-1)
14. Yuan F., Sawaya K.E., Loeffelholz B.C., Bauer M.E. (2005). Land cover classification and change analysis of the Twin Cities (Minnesota) metropolitan area by multitemporal Landsat remote sensing. *Remote Sensing of Environment*. 98(2-3), 317-328. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.08.006>
15. Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E., Moran, E. (2004). Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*. 25(12), 2365-2401. DOI: <https://doi.org/10.1080/0143116031000139863>
16. Li K., Hu X., Jiang H., Shu Z., Zhang M. (2020). Attention-Guided Multi-Scale Segmentation Neural Network for Interactive Extraction of Region Objects from High-Resolution Satellite Imagery. *Remote Sensing*, 12(5), 789. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12050789>
17. Daudt R., Saux B., Boulch A., Gousseau Y. (2018). Urban change detection for multispectral Earth observation using convolutional neural networks. *IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE Xplore*. DOI: <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8518015>
18. Chen J., Gong P., He C., Pu, R., Shi P. (2003). Land-use / land-cover change detection using improved change-vector analysis. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(4), 369-379. DOI: <https://doi.org/10.14358/PERS.69.4.369>
19. 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>
20. Boulila W., Ghadorh H., Khan M., Ahmed F., Jawad Ahmad (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>
21. 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>
22. Shi W., Zhang M., Zhang R., Chen S., Zhan Z. (2020). Change Detection Based on Artificial Intelligence: State-of-the-Art and Challenges. *Remote Sensing*, 12(10), 1688. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12101688>
23. You Y., Cao J., Zhou W. (2020). A Survey of Change Detection Methods Based on Remote Sensing Images for Multi-Source and Multi-Objective Scenarios. *Remote Sensing*. 12(15), 2460. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12152460>
24. Tian S., Ma A., Zheng Z., Zhong Y. (2020). Hi-UCD: A large-scale dataset for urban semantic change detection in remote sensing imagery. *arXiv preprint arXiv:2011.03247*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2011.03247>
25. Wang M., Tan K., Jia X., Wang X., Chen Y. (2020). A Deep Siamese Network with Hybrid Convolutional Feature Extraction Module for Change Detection Based on Multi-sensor Remote Sensing Images. *Remote Sensing*, 12(2), 205. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12020205>
26. Ankit U. (2024). Transformer Neural Networks: A Step-by-Step Breakdown [Electronic resource]. Built-In. Available at: https://builtin.com/artificial-intelligence/transformer-neural-network?utm_source=chatgpt.com
27. 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>
28. Yan J., Wang L., Song W., Chen Y., Chen X., Deng Z. (2019). A time-series classification approach based on change detection for rapid land cover mapping. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 158, 249-262. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.10.003>
29. Reba M., Seto K. C. (2020). A systematic review and assessment of algorithms to detect, characterize, and monitor urban land change. *Remote sensing of environment*, 242, 111739. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111739>
30. Zitzlsberger G., Podhorányi M., Svatoň V., Lazeký M., Martinovič J. (2021). Neural Network-Based Urban Change Monitoring with Deep-Temporal Multispectral and SAR Remote Sensing Data. *Remote Sensing*, 13(15), 3000. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13153000>
31. Hu F., Xia G.-S., Hu J., Zhang, L. (2015). Transferring Deep Convolutional Neural Networks for the Scene Classification of High-Resolution Remote Sensing Imagery. *Remote Sensing*. 7(11), 14680-14707. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs71114680>
32. Jaiswal S. (2025). Multilayer perceptrons in machine learning: a comprehensive guide. DataCamp. 2025. Available online: https://www.datacamp.com/tutorial/multilayer-perceptrons-in-machine-learning?utm_source=chatgpt.com
33. Principe J.C., Euliano N.R., Lefebvre W.C. (1999). *Neural and Adaptive Systems: Fundamentals through Simulations*. New York: John Wiley & Sons. 656.
34. Jimenez-Lopez E., Lopez-Rivero L.A. (2023). Artificial neural networks in the application of the growth of the urban sprawl. *Publicacion Semestral Padi*. 11(21), 109-119. DOI: <http://dx.doi.org/10.29057/icbi.v11i21.10565>
35. Zygmunt M., Gawin D. (2021). Application of Artificial Neural Networks in the Urban Building Energy Modelling of Polish Residential Building Stock. *Energies*, 14(24), 8285. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14248285>
36. Kuang Z., Su J., Latifian A., Eshraghi S., Ghafri A. (2024) Utilizing Artificial neural networks (ANN) to regulate Smart cities for sustainable Urban Development and Safeguarding Citizen rights. *Scientific Reports*. 14, 31592. DO: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76964-z>

37. 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>
38. Wang J., Lindenbergh R., Menent, M. (2017). SigVox – A 3D feature matching algorithm for automatic street object recognition in mobile laser scanning point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. 128, 111-129. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.03.012>.
39. Wang Y., Chen Q., Liu L., Li X., Sangaiah A.K., Li K. (2018). Systematic Comparison of Power Line Classification Methods from ALS and MLS Point Cloud Data. *Remote Sens*. 10, 1222. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10081222>.
40. 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>.
41. Republic of Estonia. Land and Spatial Development Board (2025). Estonian Geoportal. Available at: <https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/maainfo>
42. Kleemann F., Lehner H., Szczypińska A., Lederer J., Fellner J. (2017). Using change detection data to assess amount and composition of demolition waste from buildings in Vienna. *Resource Conservation Recycling*. 123, 37-46. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.06.010>
43. Zhan Y., Zhan Y., Fu K., Yan M., Sun X., Wang H., Qiu X. (2017). Change Detection Based on Deep Siamese Convolutional Network for Optical Aerial Images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 14 (10), 1845-1849. DOI: <https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2738149>
44. Kashtan V., Hnatushenko V. (2024). Machine learning for automatic extraction of water bodies using Sentinel-2 imagery. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 1, 118-127. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2024-1-11>
45. LeCun Y., Bottou L., Bengio Y., Haffner 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>

Аналіз змін міської морфології з використанням нейронних мереж

Сергій Костріков

д. геогр. н., професор, кафедра соціально-економічної географії
та регіоналістики імені Костянтина Немця,

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, Україна

Стаття висвітлює інтеграцію штучних нейронних мереж (ШНМ) із технологіями лідарного зондування та ГІС для аналізу змін у морфології урбанізованого середовища. Основна мета дослідження полягає в розробці та апробації відповідного підходу до кількісного та якісного оцінювання морфологічних змін як за умов рутинного міського розвитку, так і змін-порушень як наслідків війни. Доводиться, що класичні підходи недостатньо ефективні для виявлення протилежних за динамікою просторово-часових змін. Сучасні методи на базі глибокого навчання дозволяють не тільки аналізувати лідарні хмари точок, але й ефективно впроваджувати компаративний аналіз наборів даних щодо різних локацій міста. Нами було розроблено два методи нейромережевого аналізу:

1. *ANSE-метод*: використовує багаторівневу мережу з функцією втрат MSE (середньоквадратична помилка) та косинусною мірою схожості для порівняння наборів даних.
2. *LANN-метод*: застосовує глибоку архітектуру з контрастивною функцією втрат та евклідовою відстанню, що акцентує увагу на відмінностях, зокрема для виявлення аномалій (наприклад, руйнувань від обстрілів).

Авторське програмне забезпечення *iQ City Change Management* застосовувалося для обробки лідарних даних по двох часових реперах з різницею у три (Харків) й п'ять (Таллінн) років. Виконувалося виокремлення моделей будівель й класифікація морфологічних змін. Для Харкова проаналізовано 4 км² району Північна Салтівка: виявлено 215 «додатних» об'єктів (зміни у 2019-2021) та 51 «від'ємних» (руйнування навесні 2022). Контрольне порівняння з Таллінном (Естонія, зміни у 2017-2022) підтвердили прийнятну точність методів для рутинних змін у міському доквіллі (ШНМ-оцінка схожості 0.60-0,66 додатних змін між Харковом та Таллінном; 0,74 – від'ємних змін між двома локаціями у Таллінні).

Ключові результати:

- LANN-метод виявив суттєві відмінності між змінами під час війни й у мирний час (наприклад, ШНМ-оцінка схожості 0,35 та 0,32-0,42 для порівняння додатних та від'ємних змін між Харковом та Таллінном), що вказує на чутливість до структурних аномалій (наприклад, хаотичний розподіл руйнацій у порівнянні з «запланованими від'ємними» змінами).
- ANSE-метод ефективний для стандартних задач мирного часу, але недооцінює складність подання воєнних руйнувань.

Практичне значення: запропонований підхід надає інструменти для моніторингу відбудови міст, оптимізації ресурсів та аналізу морфологічних змін. Інтеграція ШНМ із лідарними даними розширює можливості ГІС, особливо в умовах обмеженої кількості джерел даних.

Ключові слова: ЛІДАР, міські дослідження, дистанційне міське зондування, ГІС-додаток, виокремлення забудов, визначення змін, нейронні мережі, аналітичне програмне забезпечення, нейромережеві аналітичні методи.

Надійшла 17 лютого 2025 р.

Прийнята 23 квітня 2025 р.

Urban agglomeration: human-geographical concept in the sustainable development perspective

Kateryna Kravchenko

PhD (Geography), Associate Professor,

K. Niemets Department of Human Geography and Regional Studies,

V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine,

e-mail: kateryna.kravchenko@karazin.ua,  <https://orcid.org/0000-0003-4654-3185>

ABSTRACT

Urban agglomerations are complex, open, and dynamic territorial systems that play a central role in spatial development, innovation, and societal well-being amid the challenges of globalization, environmental risks, and socio-political instability. In the context of war, forced displacement, and widespread infrastructure damage, urban agglomerations in Ukraine have emerged not only as centers of population concentration but also as crucial hubs for resilience, recovery, and strategic planning.

The purpose of this study is to conceptualize the urban agglomeration as a functional subsystem of the social and geographical system and to develop a structural model that integrates internal subsystems with multilevel external environments. The research aims to identify key elements of internal interaction and external influence, explain the systemic logic of agglomeration dynamics, and determine the role of governance in ensuring sustainability and resilience. The methodological foundation combines a human-geographical approach with systemic, synergistic, and sustainable development paradigms, supported by modeling, typology, content analysis, and analytical synthesis.

Results. The paper presents an original structural model of an urban agglomeration comprising eight interconnected internal subsystems: social, economic, demographic, innovation-technological, architectural-construction, infrastructural-service, transport-logistics, and natural-ecological. These subsystems interact via synergistic mechanisms and form a cohesive internal environment capable of adaptive self-regulation. Particular attention is paid to the governance subsystem, which includes strategic (conceptual planning), executive (implementation of decisions), and monitoring (evaluation and feedback) functions. This subsystem plays a crucial role in managing complexity and ensuring long-term sustainability. The model also systematizes the external environment into three hierarchical levels: regional, national, and global. Each level generates specific political, legal, economic, cultural, and technological impacts that shape agglomeration development. Five types of interaction—internal systemic connections, adaptive feedback loops, energy exchange, resource flows, and information-communication channels—are identified as mechanisms that maintain functional integrity, enable adaptation to external shocks, and support sustainable development trajectories. The proposed model contributes to the theoretical foundation of urban agglomeration studies by bridging disciplinary gaps and integrating spatial, functional, and governance dimensions into a unified systemic framework. It offers practical utility for strategic planning, urban policy design, sustainability assessment, and post-war reconstruction. This framework is especially relevant for countries and regions undergoing crisis or transformation, where resilient urban systems must be built on principles of sustainability, inclusiveness, and interconnectivity.

Keywords: urban agglomeration, social and geographical system, sustainable development, urban management, adaptive system, external environment.

In cites: Kravchenko Kateryna. (2025). Urban agglomeration: human-geographical concept in the sustainable development perspective. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (62), 237-256. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-18>

Introduction. Cities and urban agglomerations play a pivotal role in the contemporary globalized world, concentrating various types of resources (human, financial, innovative, etc.) and functioning as spatial and organizational centers of population settlement that accumulate major flows of energy and information, serving as key elements of the global network [20]. However, the excessive expansion of urbanized areas gives rise to a wide range of challenges, including environmental degradation, social polarization, and unequal access to basic services and resources. In this context, the issue of the formation and development of urban agglomerations in the framework of human geography becomes increasingly relevant – particularly under the imperative to transition toward a sustainable development model that ensures a balance between economic, social, and environmental components.

On the one hand, agglomerations act as powerful

centers of national economic growth and catalysts of modernization and innovation. On the other hand, they represent complex territorial entities that generate significant anthropogenic pressure and elevate the risks of ecosystem depletion and spatial inequality [20]. This binary nature of urban agglomerations—simultaneously productive and vulnerable—necessitates a fundamental rethinking of traditional approaches to their research, planning, and governance. This involves not only formal delineation of agglomeration boundaries and statistical assessment of demographic and economic indicators but also a deeper conceptualization of urban agglomerations as complex, multi-level, and dynamic subsystems within the broader socio-geosystem.

Such a perspective requires an in-depth analysis of their internal structure and governance subsystems, as well as the levels and types of external influences. Given that modern urban agglomerations are

increasingly developing along non-linear trajectories, it is critically important to incorporate the principles of synergetics into their study. Accordingly, contemporary human geography must focus on the development of a new theoretical and methodological framework for the study of urban agglomerations—one that can adequately interpret their nature, dynamics, interactions with the environment, and potential for sustainable development [12, 53]. This includes not only the categorical redefinition of core concepts but also the creation of new methodological tools for spatial analysis, assessment of agglomeration resilience, and the development of integrated planning strategies aligned with the challenges of the twenty-first century.

Particular emphasis in this context is placed on the implementation of Sustainable Development Goal 11: «Make cities and human settlements inclusive, safe, resilient and sustainable». This goal underscores the importance of transforming urbanized spaces in a way that ensures spatial inclusivity, ecological balance, access to housing and transport, among other objectives [23, 53].

While the relevance of this study applies to urban agglomerations in general, it is particularly acute for those in developing countries or regions experiencing turbulence and uncertainty—such as Ukraine. The country not only faces the challenge of rebuilding its war-torn cities but also the necessity of forming a qualitatively new urban space—safe, inclusive, and adaptive [8, 31].

In this regard, the scientific objective of the study is to refine the conceptual and terminological framework of the human-geographical approach to urban agglomerations in the light of sustainable development principles. At the same time, a key practical task lies in the development of strategic models for the spatial planning of agglomerations that incorporate social equity, ecological balance, and economic viability [23, 27]. Of particular importance is the search for mechanisms to integrate agglomeration structures into national and regional spatial development policies, taking into account population needs, environmental challenges, and the potential of digitalization in governance processes [21, 30].

Thus, there is a growing need for a comprehensive scientific understanding of urban agglomerations as key objects of the spatial organization of society – one that is grounded in the principle of balance between development and preservation, between economic efficiency and environmental safety, and between local interests and global commitments. Such an approach is not only theoretically justified but also practically essential for achieving Sustainable Development Goal 11 and ensuring a viable urban future.

Analysis of Recent Research and Publications. With the emergence of megacities and global-

level urban agglomerations, these forms of urbanized territories have become powerful centers not only for the concentration of various types of resources but also for the accumulation of pressing global challenges [9, 19]. In many countries, the process of urbanization has assumed an uncontrolled character, necessitating deep reflection by the academic community and the active involvement of a broad range of stakeholders—including government, civil society, and business [38].

A significant milestone in shaping the modern European urban development model was the Charter of European Cities Towards Sustainability (Denmark, 1994), which laid the foundations for long-term urban development strategies with an emphasis on quality of life, environmental protection, and balanced spatial planning. In 2007, the Leipzig Charter was adopted, recognizing urban agglomerations as anchor points of Europe's polycentric territorial system, capable of fostering balanced regional development and modernization of institutional governance frameworks [33].

In response to growing global challenges—including climate threats, demographic shifts, urban fragmentation, and social inequality—the New Leipzig Charter was endorsed in 2020. It proposed an innovative vision of the city as a “laboratory for solving global problems,” with a particular emphasis on large cities and agglomerations as spatial entities capable of ensuring inclusivity, compactness, functional diversity, and resilience, based on cultural, social, ecological, and economic interactions.

Urban agglomeration is thus a multidimensional and interdisciplinary research object that encompasses social, economic, demographic, cultural, ecological, and infrastructural elements. Within the structure of the socio-geosystem, it functions as a meso-level unit of society's spatial organization [21, 32]. Urban agglomerations are therefore defined as key functional nodes within the global urban system, whose efficiency significantly influences the realization of sustainable development goals [53].

The theoretical and methodological basis for the study of cities and urban agglomerations in human-geographical research was laid by Walter Christaller's central place theory. It justified the hierarchical organization of settlements and their spatial distribution as a result of market forces, accessibility, and functional division of labor. This theory introduced the concept of a dominant city—essentially an urban agglomeration—as a spatial form for organizing urban functions [6].

Subsequent conceptual development was influenced by John Friedmann's theory of world cities, which viewed megacities as the primary nodes of global control and economic coordination [11]. Saskia Sassen elaborated this concept further by

introducing the idea of the global city as a space with high concentrations of financial institutions, advanced services, and transnational functions. Together, these concepts established a foundation for understanding cities and urban agglomerations as central elements of the global urban system [51].

Peter Hall's work expanded the notion of polycentric urban structures, presenting cities not as monolithic cores but as composed of multiple interconnected centers. This model is especially relevant to contemporary urban agglomerations, which increasingly take on multi-nodal configurations [15]. In a similar vein, Manuel Castells proposed the concept of networked urbanism, where the city functions as a communicative network linking sites of intense information exchange and knowledge production within the global economy.

In the context of the non-linear dynamics of urban systems, the principles of synergetics have become particularly significant [5]. The ideas of Hermann Haken and Ilya Prigogine enable us to consider urban agglomerations as open, non-linear systems capable of self-organization, adaptation, and resilience in response to both internal and external disturbances. This becomes especially relevant in analyzing the adaptive behavior of urban agglomerations under crisis conditions—whether of natural or anthropogenic origin [14, 49].

Edward Soja's perspective on the post-industrial city as a fragmented, hybrid space characterized by multi-vector spatial identity also contributes to this discourse. In this view, cities and urban agglomerations represent intersections of real and virtual spaces, where traditional boundaries dissolve, and discreteness gives way to continuity [52].

Contemporary studies increasingly extend the typology of agglomeration forms to include megalopolises, mega-regions, and technopolises as examples of innovation-oriented urban clusters. Research on current urbanization processes and the formation of urban agglomerations is attracting growing attention from scholars in various disciplines.

An analysis of Ukrainian academic literature on urbanization and agglomeration development reveals the object's pronounced interdisciplinary nature. Human geographers – such as Yu. Pityurenko [47], H. Topchiiev [54], O. Shablii [55], Ye. Marunyak [35], S. Kostrikov [18], Yu. Palekha [44], V. Poruchynskyi [48], R. Lozynskyi [34], K. Mezentshev [36, 37], H. Pidhrushnyi [45, 46], I. Pylypenko [50] – alongside experts in related fields such as M. Babaiev [1], L. Bychenko [4], M. Diomin [7], and S. Bohachov [3], have addressed various dimensions of urban agglomeration development, including geo-urbanistic, economic, administrative, social, ecological, urban planning, legal, and other aspects.

Given the new challenges of decentralization,

post-war transformation, climate change, and population mobility, there is a pressing need to develop a comprehensive, interdisciplinary methodology for studying urban agglomerations in both Ukraine and the global context.

In our previous studies, we have explored the features of urban agglomeration formation and development from the perspective of human geography—particularly in the case of Kharkiv Oblast. We have analyzed global agglomerations through the lens of synergetic theory, investigated global cities and urban agglomerations, and examined the prospects for human-geographical research on agglomerations [19–31, 39]. We have also considered methods and approaches for delineating urban agglomeration boundaries in the spatial dimension.

However, in our view, one of the most pressing theoretical and methodological tasks is the development of a structural model that would clarify the internal environment of an urban agglomeration, the influences of the external environment, and their constituent elements.

Urban agglomerations are urbanized areas functioning as complex spatial entities characterized by a high degree of socio-economic, infrastructural, and informational interaction. While recent academic discourse has paid considerable attention to the spatial organization of agglomerations—their morphological types, hierarchies, and boundary delimitation—less attention has been given to their functional structure as subsystems of the socio-geosystem. Specifically under-researched are the internal interactions between subsystems, the mechanisms of system support and adaptability, and the degree of openness and resilience to external influences.

Equally underexplored are the processes of interaction between urban agglomerations and the external environment. Most existing studies treat the external environment in a fragmented way, lacking adequate systematization of its structural levels, directions of influence, and types of linkages.

Moreover, the issue of agglomeration governance remains highly relevant. Urban agglomerations function as complex, open systems that require effective coordination among subsystems, real-time monitoring of system status, and the capacity to respond to challenges such as socio-economic polarization, environmental threats, and transport congestion. As of now, there is no unified model of governance interventions that allows for strategic planning, regulation, and control of agglomeration development in dynamic environments.

In the context of transitioning to a sustainable development paradigm, particular attention must be paid to the interrelations between the internal elements of agglomerations and external factors influencing the achievement of balance across the social,

economic, and environmental dimensions of sustainability. The key problem lies in the absence of a comprehensive, scientifically grounded model that would systematize all agglomeration subsystems, define types of interactions among them, and determine the role of the governance subsystem in implementing sustainable development strategies

Methods. *The aim of the study* is to develop a conceptual understanding of the urban agglomeration as a complex subsystem of the socio-geosystem in the context of implementing the principles of sustainable development, to construct a structural model of its organization, and to substantiate the functional interaction between its internal subsystems and external influences. The research employs a human-geographical approach, which allows urban agglomerations to be considered as complex elements within the «society–nature–economy» system; a systems approach, which provides a holistic view of the agglomeration's internal structure as an interconnected set of functional subsystems and their linkages with the external environment; a synergetic approach, which enables the analysis of the agglomeration's capacity for self-regulation, resilience, equilibrium, and adaptation under external disturbances; and the concept of sustainable development as a methodological foundation for analyzing the transformation of urban agglomerations in accordance with its goals and objectives. Throughout the study, several methods were applied: the modeling method was used to construct the structural model of the urban agglomeration; content analysis served to explore relevant scientific sources, theoretical concepts, and development programs; analytical synthesis was employed to summarize interdisciplinary approaches; the typological method was used for the classification of internal subsystems; the graphical-analytical method supported the visualization of the structural model and its components; and the method of analogy was applied to adapt effective global practices for the governance of urban agglomerations.

Results. Given the complexity of urban agglomeration structures and their inherent functions, a pressing scientific task is to develop models that consider not only their internal configuration but also their adaptive interactions with regional, national, and global environments. This approach allows not only for a description of the spatial-functional organization of the urban agglomeration but also for an analysis of its potential for sustainable development under conditions of uncertainty. The term *urban agglomeration* is herein proposed to be understood as «a complex, open, and dynamic spatial-functional subsystem of the socio-geosystem, formed through the integration of a central settlement core with surrounding urbanized territories, characterized by intensive internal linkages, a hierarchical structure, the

capacity for self-organization and adaptation, as well as the ability for self-development under the influence of external and internal factors through fluctuations, bifurcation points, and phase transitions that determine its further development trajectory». The urban agglomeration functions as a component of the socio-geosystem, which is marked by the interconnection of its subsystems, the presence of multilevel linkages, synergetic properties, and adaptive capacity. It possesses an integrated structure comprising an internal environment, a governance subsystem, and an external environment composed of various hierarchical levels [30]. Within the framework of the urban agglomeration model, the internal environment is conceptualized as a complex, interconnected system consisting of eight key subsystems that ensure its viability, integrity, and operational resilience: social, economic, demographic, innovation-technological, architectural-construction, infrastructure-service, transport-logistics, and natural-ecological (Fig. 1) [12, 14].

The *social subsystem* of an urban agglomeration represents a key element of its internal environment, reflecting the qualitative characteristics of the population's living conditions, the level of social integration, accessibility to basic services, and the degree of development of social capital. It plays a critical role in shaping an inclusive, cohesive, and adaptive social space that ensures the stability, resilience, and viability of the urban agglomeration [35, 27]. The social subsystem is closely integrated with the demographic subsystem, which includes population characteristics (such as total population, age and gender structure, ethnic composition, migration, and mobility); with the infrastructure subsystem (covering health care, education, social protection institutions, and cultural and recreational facilities), ensuring a decent standard and quality of life (housing conditions, income levels, access to services); and with indicators of social mobility and cohesion (integration of vulnerable groups, public participation in decision-making, local identities), as well as security parameters (law and order, population's sense of safety) [54].

Functionally, the social subsystem supports social equity, fosters mechanisms of social integration, and responds to external threats—including natural, anthropogenic, epidemiological, and military shocks. A specific feature of this subsystem is its spatial heterogeneity, manifesting in the uneven distribution of social benefits between the core and the periphery of the urban agglomeration [2]. In Ukraine, these phenomena have been exacerbated by internal migration and forced population displacement due to military conflict. Within the framework of the UN Sustainable Development Goal 11 ("make cities and human settlements inclusive, safe, resilient, and sustainable"), the social subsystem is not only an object affected by



Fig. 1. Internal Environment of an Urban Agglomeration (compiled by the author)

urban transformation but also an active agent in shaping a qualitatively new urban space [53]. It serves as an indicator of progress toward social justice, inclusiveness, and equal access to resources and services – all of which directly influence the resilience of the urban agglomeration.

The *natural-ecological subsystem* of the urban agglomeration is another core component of its internal environment, ensuring ecological balance and the capacity of the urban space to adapt to climate and technogenic challenges. It includes both natural components of the agglomeration environment (green zones, water bodies, soils) and anthropogenically transformed elements of ecological significance—such as industrial areas, transport infrastructure, solid waste disposal sites, wastewater treatment facilities, and water supply and drainage systems [8, 23]. Within urban agglomerations, the natural-ecological subsystem operates under constant intensive pressure due to high population density and the presence of industrial facilities [1].

Its key functions include maintaining environmental balance, environmental protection, creating a comfortable living environment, securing natural resources for human activity, and implementing spatial zoning that accounts for environmental constraints and risks. It plays a buffer role between the urban core and the external environment, absorbing part of the environmental burden, regulating microclimates, purifying air, and more. Structurally, the natural-ecological subsystem consists of green infrastructure (parks, squares, forest parks, gardens, and recreational areas); water systems (rivers, lakes, reservoirs, stormwater infrastructure); land resources (urban soils, regeneration zones); environmental quality support services (air purification, temperature regula-

tion, hydrological balance maintenance); and a system for environmental monitoring and risk management [9]. It is closely linked to other subsystems—particularly infrastructure, transport, architectural-construction, and social—since environmental conditions directly affect human health, living standards, safety, and overall quality of life. This subsystem acquires special significance in the context of global ecological change and climate policy implementation [16]. Critical tasks include climate change adaptation, reduction of greenhouse gas emissions, waste management, remediation of contaminated sites, expansion and quality improvement of green areas, and conservation of natural reserves. These efforts are central to ensuring the sustainable development of urban agglomerations. Moreover, the integration of “green” and “blue” infrastructure principles into urban planning systems remains equally vital [38]. In the context of the UN Sustainable Development Goals, the natural-ecological subsystem is directly related to Goals 6 (clean water and sanitation), 11 (sustainable cities and communities), 13 (climate action), 14 (life below water), and 15 (life on land). Its effective functioning is a prerequisite not only for environmental but also for social and economic resilience of the urban agglomeration [53].

The *economic subsystem* is one of the core elements of an urban agglomeration’s internal environment, as it determines the level of resource provision, competitiveness, investment attractiveness, and the overall development of the entire system. Its functioning is based on the interaction among entrepreneurial, industrial, service, financial, and innovation sectors, which ensure the circulation of material and financial flows, job creation, generation of gross regional product, and the filling of local budgets [3].

The economic subsystem serves as a foundation for social stability, structural transformation, and the spatial growth of the agglomeration [4].

Its structural components include industrial clusters, business centers, labor markets, development institutions (such as technoparks and business incubators), agro-industrial zones, trade and logistics complexes, as well as small and medium-sized enterprises. The subsystem exhibits spatial heterogeneity and displays uneven patterns of economic activity within the agglomeration. The central core is typically characterized by higher economic activity, while in a post-industrial society it tends to concentrate information flows and innovation. The periphery, in contrast, demonstrates lower levels of economic activity and often hosts industrial and agro-industrial functions [2, 35].

The *primary functions* of the economic subsystem include ensuring population employment, creating conditions for investment and entrepreneurship, supporting regional specialization, and integrating into global economic networks. It also facilitates the development of business support infrastructure and maintains the financial self-sufficiency of territories [43]. In addition, it provides social transfers through taxation systems, supports the development of transport and social infrastructure, and contributes to the modernization of other subsystems through innovative products and services.

In the context of sustainable urban development, the economic subsystem must ensure not only growth but also balance. This implies a transition to a “green economy” model, the development of circular production, the promotion of innovation, and investment in socially and environmentally significant sectors. Particularly important is the transformation of industrial potential in agglomeration centers toward high-tech, energy-efficient, and environmentally neutral production.

In the current context of global instability, warfare, infrastructure destruction, and disrupted logistics in Ukraine, the adaptability of the economic subsystem becomes critical for territorial recovery and subsequent growth. Urban agglomerations have the potential to serve as engines of recovery, as they concentrate the country's key financial-industrial, educational-scientific, and labor resources. The restoration of production chains, attraction of foreign investment, and development of innovation-oriented environments are essential elements of strategic economic governance [4].

The economic subsystem is closely interconnected with other internal components of the urban agglomeration. It requires high-quality infrastructure (transport and utilities), an educated and healthy population (social subsystem), a favorable ecological environment, effective spatial planning, and efficient

governance. Its performance directly determines the agglomeration's resilience to external shocks and crises, as well as its capacity for self-development [31, 38].

Within the framework of the UN Sustainable Development Goals, the economic subsystem is primarily linked to Goals 8 (Decent Work and Economic Growth), 9 (Industry, Innovation, and Infrastructure), 11 (Sustainable Cities and Communities), and 12 (Responsible Consumption and Production). Its functional integration into the urban agglomeration model ensures the coherence of the socio-geosystem, development dynamism, and achievement of economic resilience [53].

The *demographic subsystem* ensures the reproduction of human capital and is a critical element of the urban agglomeration's internal environment, as human capital determines not only the quantitative but also the qualitative parameters of its socio-economic and spatial development. This subsystem forms the foundation for the functioning of other urban components—from labor resources to consumers of goods and services [48].

Key characteristics of the demographic subsystem include total and population density, age, gender, and ethnic composition, migration flows, and other components of demographic dynamics. Also important are the population distribution between the core, satellite cities, and peripheral areas; urbanization indicators (urbanization level, share of urban and suburban population); and settlement patterns (polycentric or monocentric). The subsystem is dynamic and sensitive to internal and external challenges—economic, political, environmental, and security-related. This sensitivity is especially evident during times of crisis: war, economic recessions, or pandemics. Demographic shifts such as depopulation, aging, deurbanization, and internal displacement significantly impact urban planning, demand for housing, education and healthcare services, transportation load, and the capacity of social infrastructure [54, 55]. *Functionally*, the demographic subsystem provides labor resources for the economic subsystem, serves as a basis for spatial planning (based on population density and settlement structure), and generates social demand for infrastructure (schools, hospitals, transport). It supports the cultural and linguistic environment as part of social integration and stimulates innovation through youth clusters and mobile population groups. Currently, the demographic subsystem of Ukrainian urban agglomerations is undergoing significant transformation. Mass internal displacement, war-related population losses, complex security conditions in the East, North, and South of Ukraine, and the temporary occupation of territories pose substantial challenges to the recovery of affected agglomerations. At the same time, the demographic potential

of Ukrainian urban agglomerations that have received large numbers of displaced persons may either strengthen or overburden local life-support systems [26, 31].

From the standpoint of sustainable development, demographic resilience becomes particularly important—i.e., the ability of urban agglomerations to maintain adequate population levels, ensure population renewal, and reduce depopulation. This requires the development of programs to support young families, ensure access to affordable housing, create safe environments, and provide services for all age groups [25]. Within the framework of the UN Sustainable Development Goals, the demographic subsystem is closely related to Goals 3 (Good Health and Well-Being), 4 (Quality Education), 5 (Gender Equality), 10 (Reduced Inequality), and 11 (Sustainable Cities and Communities). Its effective functioning is a key prerequisite for long-term agglomeration resilience and for the realization of the “city for people” concept [53].

The *innovation and technological subsystem* of an urban agglomeration serves as a catalyst for development and modernization, ensuring competitiveness and sustainable growth. It encompasses a wide range of institutions, including research organizations, higher education institutions, technology parks, business incubators, innovation clusters, as well as IT infrastructure, smart city management systems, and digital services that facilitate the generation, transfer, and implementation of cutting-edge knowledge, technologies, and solutions across all domains of urban life and beyond [5, 16].

The innovation-technological subsystem ensures the agglomeration’s competitiveness, modernization, and implementation of innovative solutions toward sustainable development. It is oriented toward the generation, dissemination, and application of innovation across all other urban subsystems. Its structural components include academic and research institutions, business incubators, technology parks, innovation clusters, IT companies and digital platforms, smart city infrastructure, and urban digital services [10].

Key functional roles of the innovation-technological subsystem include the generation of innovations (through R&D at universities and research centers), dissemination of technologies (adapting new solutions for housing and utilities, transport, architecture, medicine, education), digitization of governance (e-governance systems, open data platforms, intelligent decision-support tools), and fostering a creative environment (supporting start-up culture, tech festivals, educational hubs, and platforms for “government-community-business” interaction) [10, 21].

The innovation-technological subsystem is directly linked to the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs). In particular, it contributes

to the achievement of SDG 4 (ensuring quality education and fostering scientific potential), SDG 9 (promoting industry, innovation, and infrastructure), SDG 11 (building sustainable and technologically advanced cities), and SDG 17 (developing partnerships for the implementation of innovations) [53]. Its ability to respond adaptively to external challenges—such as war, energy crises, economic recessions, or global technological shifts (e.g., artificial intelligence, renewable energy, 5G, autonomous transport)—is of particular importance. In the post-war recovery of Ukrainian urban agglomerations, this subsystem will act as a “locomotive” of reconstruction through the development of new construction materials, green technologies, digital infrastructure management platforms, and innovations in security, logistics, and energy systems [21].

The effectiveness of this subsystem depends largely on the availability of human capital, investment attractiveness, intersectoral cooperation, and the presence of a strong research and educational environment capable of generating knowledge and preparing specialists. Its integration into the economic, social, and governance structures of the agglomeration enables job creation, enhances service quality, promotes inclusive territorial development, and reduces the digital divide. This subsystem plays a vital role in achieving SDGs 9 (Industry, Innovation and Infrastructure), 11 (Sustainable Cities and Communities), 4 (Quality Education), and 17 (Partnerships for the Goals). The application of innovation and technology within urban agglomerations is a critical condition for their resilience, mobility, ecological responsibility, and self-renewal capacity in a rapidly changing global environment. Thus, the innovation-technological subsystem not only transforms urban agglomerations but also defines their future development trajectory—from consumers to generators of innovative solutions, knowledge, and technologies [53].

The *architectural and construction subsystem* of an urban agglomeration fulfills the fundamental function of shaping the anthropogenically transformed physical environment in which population life processes unfold. It encompasses urban development, functional zoning, urban landscape morphology, street and road network structure, types of residential and public buildings, architectural design of urban infrastructure facilities, and the spatial logic of the location of key functional centers and subcenters within the urban agglomeration [1, 3]. This subsystem embodies urban concepts and strategies through construction, design, renovation, and technical modernization of infrastructure. It plays a crucial role in determining the comfort, safety, attractiveness, and functionality of the urban environment and in shaping the visual identity and emotional perception of the urban agglomeration for residents and visitors

alike [7].

Its *functional efficiency* depends on its capacity to adapt to contemporary urban challenges such as increasing urban density, gentrification, and other transformation processes. It must also address the need for architectural principles that prioritize safety. In the context of rebuilding Ukrainian cities after large-scale destruction, this subsystem is tasked with creating a new urban morphology grounded in principles of sustainability, energy efficiency, barrier-free access, digitalization, and spatial justice [17].

The *architectural and construction subsystem* creates urban space not only for living but also for working, recreation, communication, and socialization. Its effective functioning fosters polycentric spatial models, reduces commuter migration, enhances the attractiveness of peripheral zones, and optimizes resource use within the agglomeration [2, 30]. New architectural approaches emphasize inclusive design, industrial zone revitalization, and preservation of cultural heritage. Key areas for development include implementing sustainable building standards, constructing energy-efficient housing, harmonizing building height with the natural environment, designing adaptive and inclusive public spaces, and integrating architectural planning with natural and landscape features. The alignment of the architectural-construction subsystem with other agglomeration subsystems ensures systemic integrity and high-quality urban environments. It is not only the technical foundation of urban space but also an indicator of economic development [1, 4].

This subsystem directly supports the achievement of multiple SDGs, particularly SDG 11 (Sustainable Cities and Communities), by shaping safe, inclusive, accessible, and ecologically balanced urban spaces with quality housing and effective zoning. Under SDG 9 (Industry, Innovation and Infrastructure), it incorporates advanced construction technologies, energy-efficient materials, and intelligent design solutions.

The infrastructure and service subsystem of the urban agglomeration plays a crucial role in ensuring basic living conditions and in shaping a high-quality urban environment. It encompasses a wide range of service functions, including water and electricity supply, gas and heat provision, sanitation systems, household services, and social, cultural, medical, educational, administrative, and utility infrastructure. Its performance directly influences urban comfort, safety, social inclusion, and resident well-being, while also acting as a determinant of urban resilience [27, 54].

This subsystem interacts closely with other components of the internal environment. It supports the social subsystem through access to health care, education, and social services; the economic subsystem

through logistics and business services; and the ecological subsystem via waste management, recycling, and resource control. The balanced operation of this subsystem is a prerequisite for creating competitive, inclusive, and environmentally responsible urban spaces [36]. Within the context of sustainable development, the infrastructure and service subsystem corresponds to SDG 3 (Good Health and Well-Being) through quality healthcare access, SDG 4 (Quality Education) through educational infrastructure, SDG 6 (Clean Water and Sanitation), and SDG 11 as a basic mechanism for enabling safe, inclusive, and resilient cities [53].

The *transport and logistics subsystem* is a critically important component of the internal environment of an urban agglomeration. It ensures spatial connectivity within the agglomeration, links to external environments, population mobility, economic functioning, and integration of the agglomeration space. It includes systems of passenger and freight transport, urban and suburban transport infrastructure, intercity and international transport corridors, stations and airports, logistics hubs, sorting facilities, and transport communication nodes. The effectiveness of this subsystem significantly influences the dynamics of socio-economic development, territorial investment attractiveness, quality of daily life, and environmental conditions [28, 55].

It serves as the connective framework that links the urban agglomeration core with peripheral areas, ensuring the circulation of people, goods, services, resources, and information. It contributes to the expansion of the agglomeration's spatial field, improves transport accessibility, reduces time costs, and increases productivity. Closely interacting with other subsystems, it supports economic activity (by enabling logistics and business functions), social processes (by ensuring service access), ecological sustainability (by influencing emissions and noise levels), and architectural planning (by shaping the basis for spatial planning and zoning) [29].

Within the framework of sustainable development, this subsystem corresponds to SDGs such as SDG 7 (Affordable and Clean Energy) through energy-efficient transport systems, SDG 9 (Industry, Innovation, and Infrastructure), SDG 11 (Sustainable Cities and Communities), and SDG 13 (Climate Action). The transport and logistics subsystem thus functions not only as the infrastructural backbone of the agglomeration but also as a powerful regulator of its spatial organization, socio-economic dynamics, and environmental resilience. Its modernization is a vital precondition for ensuring the sustainable, integrated, and balanced development of urban agglomerations [53].

In conclusion, each subsystem fulfills specific functions while forming part of a unified systemic

entity that ensures adaptability and functional integrity of the agglomeration. The interconnections among these subsystems are systemic in nature, facilitating the exchange of resources, information, and energy, as well as the implementation of governance measures.

The next structural level of the model is represented by the agglomeration *administrative system*,

which includes *management, executive, and monitoring* subsystems. These components are essential for adapting internal processes to changes in the external environment and for ensuring comprehensive urban agglomeration governance (Figure 2) [41, 42].

The *management subsystem* is a key component of the governance system of an urban agglomeration. It defines the long-term development trajectory, est-

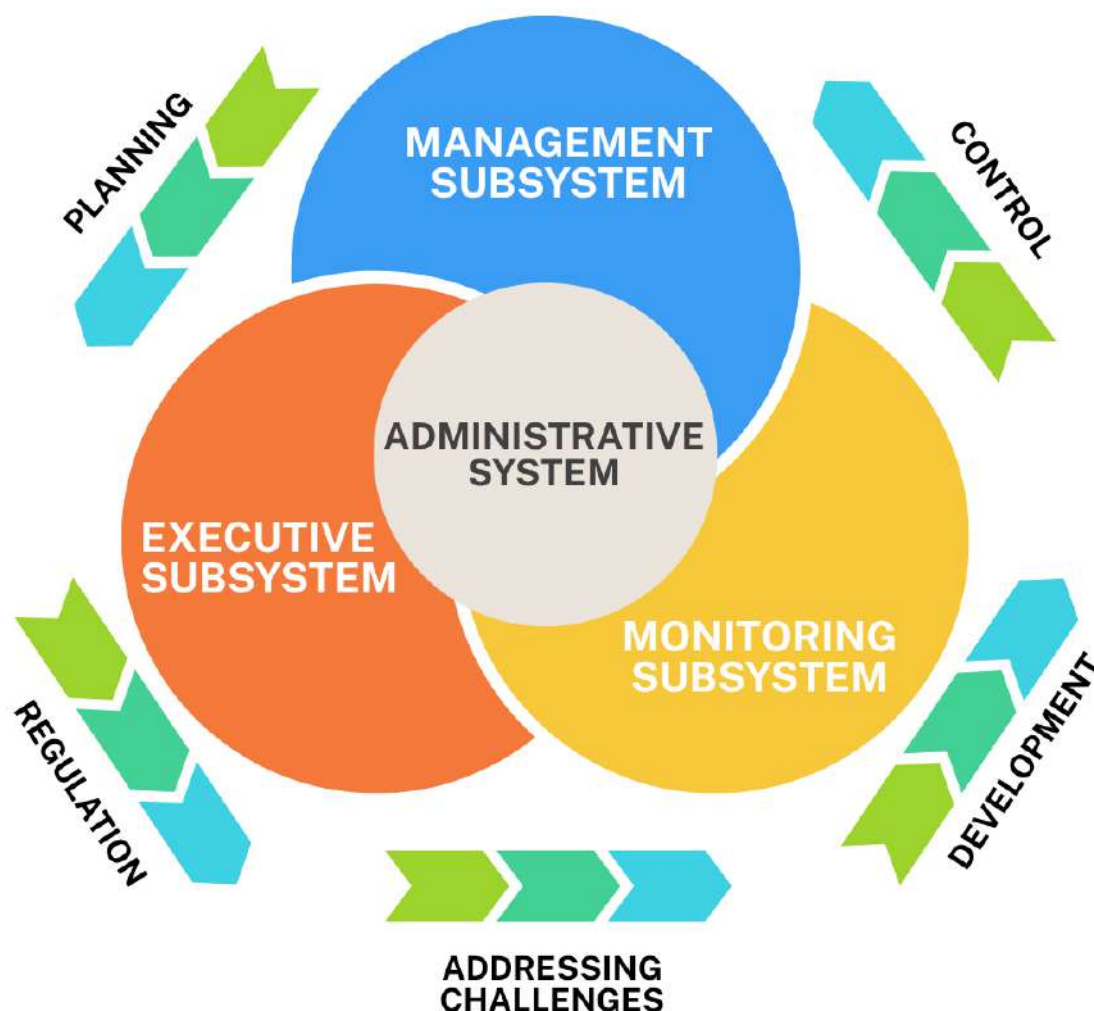


Fig. 2. Urban agglomeration governance system and its components (compiled by the author)

establishes the institutional foundations, and ensures a holistic vision of spatial transformation aligned with the principles of sustainable development. This subsystem functions as a generator of strategic decisions, coordinating the activities of various stakeholders and directing them toward achieving comprehensive sustainability goals. One of its core functions is the formulation of the conceptual basis for urban agglomeration development. This includes defining the mission, strategic priorities, tactical tasks, and operational objectives. The articulation of a development vision makes it possible to identify the desired future state of the agglomeration and guides inter-municipal strategic planning—especially relevant for agglomerations spanning multiple local governments or administrative-territorial units. In this context, the

managerial subsystem must ensure the integration of development goals across municipalities, alignment of sectoral strategies, and harmonization of spatial policies.

Its institutional foundation encompasses the establishment of urban agglomeration governance bodies, the development of cooperation frameworks between municipalities, financing mechanisms for joint projects, and the implementation of multilevel governance principles [41]. Strategic management must incorporate a participatory approach, involving community representatives, businesses, research institutions, and civil society organizations in the decision-making process. This aligns with SDG 16 regarding inclusive institutions, accountability, and participation. Another critical function is the integration of

sustainability principles at all levels of planning—from local socioeconomic development programs to master spatial plans. This requires balancing the three pillars of sustainability: economic viability, social equity, and environmental responsibility. The managerial subsystem must also be proactive and adaptive—able to anticipate external risks (economic, geopolitical, military, environmental, social, etc.) and develop mechanisms to adjust to them. This includes strategic foresight under uncertainty and scenario planning.

The executive subsystem is a core component of the governance system responsible for the practical implementation of strategic decisions, management programs, and regulatory mechanisms. Its primary purpose is to translate governance objectives into concrete actions, projects, and initiatives that ensure the viability, resilience, and balanced development of urban agglomerations [42]. It includes local governments and executive authorities functioning within the agglomeration—city and town councils, departments for territorial development, urban planning, transportation, public utilities, education, health care, and more. It may also involve intermunicipal structures or development agencies tasked with coordinating cooperation, territorial planning, resource distribution, and delegation of powers. Municipal enterprises, transport operators, education and healthcare institutions, and social service providers form an essential part of the executive system, delivering critical infrastructure and basic services [41].

The efficiency of this subsystem depends largely on coordination between its components, the degree of autonomy, availability of resources, and capacity for innovation. Digitalization plays an increasingly important role, including the use of data platforms, e-services, participatory tools, and mechanisms of e-governance. Given the spatial complexity of urban agglomerations, the executive system must enable multilevel governance that accounts for the specific needs of agglomeration cores, suburbs, satellite towns, and peripheral areas. In the post-war recovery context, its mandate includes not only crisis response but also ensuring long-term development in line with sustainability goals. This requires integrating social, economic, and environmental priorities; managing change flexibly; ensuring procedural transparency; and fostering openness to partnerships and new territorial governance models. Ultimately, the executive subsystem operationalizes governance strategies and policies and transforms vision into tangible urban transformations.

The monitoring subsystem is a dedicated functional unit designed to provide continuous observation, analysis, and evaluation of key processes occurring both within and around the agglomeration. It serves as a diagnostic tool for identifying positive

trends, threats, imbalances, and deviations from strategic objectives—thereby supporting management adaptability and informed decision-making [41]. This subsystem monitors all eight components of the internal agglomeration environment (social, economic, demographic, innovation-technological, architectural-construction, infrastructure-service, transport-logistics, and environmental) using key indicators of sustainable development and tracking the implementation of governance strategies. It also evaluates the influence of the external environment, including changes in legislation, investment climate, and geopolitical dynamics.

Core tools of this subsystem include GIS platforms, statistical databases, sociological surveys, and satellite imagery. The use of open data and e-governance tools ensures transparency and public accountability. Beyond merely tracking the current state, the monitoring subsystem must support scenario forecasting, risk assessment, and crisis prevention. Its role is to supply the managerial and executive subsystems with reliable, current, and structured information for decision-making, resource planning, strategy development, and policy adjustment.

Interactions between the three governance subsystems are complex, interdependent, and cyclical. The urban agglomeration governance system functions as an integrated structure comprising the managerial, executive, and monitoring subsystems. These interact in a systemic, cyclical, and adaptive manner, supporting the complete management cycle: planning, regulation, crisis response, development, and oversight [24].

The management subsystem handles long-term planning, defines the agglomeration's mission and vision, sets development priorities, identifies strategic growth zones, and shapes policy directions. It accounts for both internal needs and external challenges, including demographic shifts, security concerns, and labor market dynamics—especially relevant in the post-war recovery context. As part of its regulatory function, it formulates legal documents, concepts, and strategies that set the operational framework for executive bodies.

The executive subsystem implements strategies and policies through operational management, decision-making, and program execution. It coordinates all internal agglomeration subsystems, builds institutional mechanisms for development, and adapts governance tools to challenges, including emergencies and conflict. It manages internal processes such as resource mobilization, institutional coordination, and project delivery.

The monitoring subsystem conducts ongoing control, information collection and processing, and evaluation of implemented actions. It provides feedback to the strategic level, enabling plan and policy

adjustments. In a rapidly changing environment, it forms the basis for adaptive governance, enabling urban agglomerations to remain resilient to external influences and progress toward sustainability objectives [24, 41].

In our view, the external environment of an urban agglomeration must be differentiated by the type and intensity of influence across three hierarchical

levels—regional, national, and global—forming a complex field of exogenous factors. These include geopolitical conditions, security challenges, intergovernmental legislation, national and regional policy, climate change, cultural trends, migration flows, state subsidies, investment levels, and global technological shifts (Figure 3) [31, 54, 55].

The *regional level* of the external environment

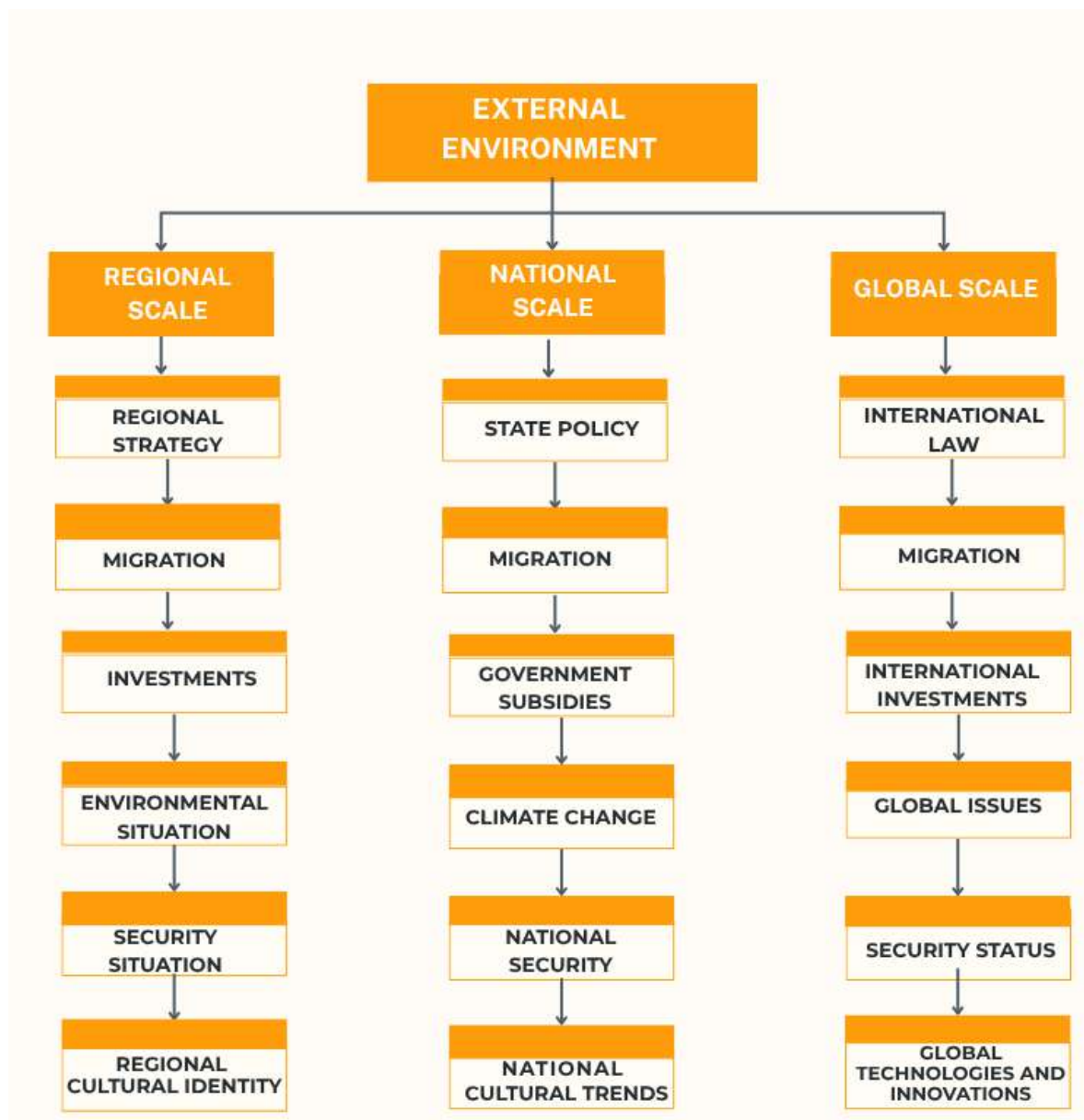


Fig. 3. Structure of the external environment of an urban agglomeration (compiled by the author)

of an urban agglomeration is a critical component of the multi-level system of external influences shaping the conditions for the functioning and development of urbanized territories. Within the proposed model, it is conceptualized as the foundational hierarchical tier in analyzing urban agglomerations, directly interacting with the internal environment and determining the spatial, socio-economic, ecological, and cultural dynamics of development. At this level, both relatively stable political and strategic contexts and high-

frequency adaptive responses to local and global challenges are recorded. Six key influencing elements are distinguished within this structure.

Regional policy serves as a fundamental instrument for shaping development trajectories in accordance with spatial planning priorities and strategic management goals. It encompasses tools such as territorial marketing, program-targeted planning, spatial zoning, and inter-municipal cooperation—providing the basis for a comprehensive urban policy. The regi-

onal level is responsible for balancing spatial development, coordinating the functional roles of the agglomeration core and peripheral municipalities, and implementing integrated development projects [41].

Commuter migration is the second key element, which reaches its greatest scale and impact within agglomeration systems. It refers to the daily movement of population between the core and suburban areas for work, education, and access to services. This process indicates the degree of spatial integration within the agglomeration and imposes strain on the transport and logistics subsystem, the environment, and social infrastructure. Addressing commuter migration requires regional planning of transit routes, optimization of public transport logistics, improvement of accessibility for remote areas, and balance in the territorial division of labor.

Investment, as the third component, plays a decisive role in stimulating economic growth within agglomerations. This includes not only financial inflows into infrastructure or entrepreneurship, but also institutional support for innovation clusters, development of technology parks, and creation of favorable conditions to enhance territorial investment attractiveness. The regulatory function of this dimension involves coordinating state, municipal, and private resources within regional development programs [4].

Environmental conditions, the fourth element, become especially pressing in agglomerated spaces due to the high concentration of population and economic activity. Environmental stress manifests in air pollution, declining water quality, soil degradation, and a shortage of green spaces. At the regional level, environmental policy is shaped, ecological monitoring is conducted, and restoration programs are implemented—thus laying the foundation for the environmental dimension of urban agglomeration sustainability.

Security, the fifth structural element, encompasses a broad range of challenges at the regional level—from public safety to emergency preparedness and response to technological and natural hazards. Its relevance increases under conditions of martial law, natural disasters, or social crises. Regional authorities coordinate civil protection, evacuation planning, critical infrastructure resilience, and public awareness initiatives.

Regional cultural identity provides the mental, symbolic, and communicative foundation for spatial development. It encompasses traditions, customs, forms of cultural expression, language, historical heritage, architectural style, and characteristics of civic life. Regional identity manifests in territorial branding, agglomeration image-building, support for cultural initiatives, and development of creative industries [10]. It also contributes to maintaining social cohesion and cultivating a sense of belonging.

The *national level* of the external environment plays a systemic role in enabling the functioning and development of urban agglomerations. It provides the regulatory, institutional, demographic, economic, and security frameworks. This level integrates national strategic policy priorities with local realities, acting as an intermediary between global processes and regional challenges. It is critical for synchronizing spatial development within agglomerations with national sustainable development goals [22].

A primary element of the national level is state policy, which defines the overall principles, approaches, and mechanisms for regulating urbanization processes, managing territorial development, spatial planning, and decentralization. Through legislative initiatives, regional development strategies, master plans, standards, and national programs, the state establishes the legal framework for agglomeration functioning. The implementation of concepts for integrated territorial development and the adoption of legislation on agglomerations or urban districts reflect efforts to systematize the country's spatial organization.

Internal migration is another key factor that shapes the socio-demographic structure of urban agglomerations. In Ukraine, this process has intensified due to military conflict, resulting in large-scale population displacement both across the country and within specific urbanized areas. Internal migration alters the burden on social infrastructure, housing, and labor markets, while influencing the demographic resilience of both the agglomeration core and periphery. During crises, the state acts as a regulator and guarantor of social protection, developing policies for internally displaced persons (IDPs) to ensure their housing, service access, and employment [26].

Another key component is state subsidies and grants, which serve as financial instruments for stimulating the development of urban agglomerations. Through mechanisms of budget equalization, state subventions, infrastructure grants, concessional loans, and public-private partnerships, the state can support large-scale projects in the areas of transportation, energy, education, and healthcare. Notably, national support programs have enabled initiatives on energy efficiency, infrastructure modernization, and digital transformation of cities. In the post-war period, targeted financing for the reconstruction of damaged areas has become a pressing issue. Climate change is increasingly being integrated into national strategies and plans. Urban agglomerations, as centers of anthropogenic pressure, are vulnerable to the effects of climate change—extreme weather, flooding, declining air quality, and more. In this context, the state performs a coordinating function in implementing climate adaptation principles, promoting green technologies, advancing sustainable mobility, transi-

tioning to energy-efficient construction, and reducing the carbon footprint of cities.

National security in the current context encompasses not only military but also social, energy, and digital dimensions. For urban agglomerations, this implies ensuring the resilience of life-support systems, protecting critical infrastructure, maintaining information security, preparing for epidemiological threats, and defending against cyberattacks. National programs for digital transformation, cybersecurity, and civil protection serve as the foundation for enhancing the resilience of urbanized territories [31].

National cultural trends shape the broader sociocultural context for the development of urban agglomerations. These include growing societal demands for comfortable urban environments, inclusivity, creative spaces, and civic participation in urban development decision-making. Shifts in value orientations affect urban planning approaches, architectural design, and policies in culture, heritage, and leisure—critical for building sustainable, attractive, and competitive agglomerations.

The *global level* of the external environment is a vital component of the exogenous influences on the functioning and development of urban agglomerations. It encompasses transnational processes, trends, and challenges that transcend national borders yet have direct impacts on urbanized territories through economic, legal, environmental, technological, and social channels. In a globalized world, urban agglomerations increasingly operate as elements of a global urban system, shaped by planetary changes and institutional frameworks.

A key global influence is international law, which sets the framework for cooperation among states, cities, and regions on issues such as sustainable development, climate commitments, human rights, migration, urban governance, and security [11]. Through participation in international conventions, charters, and agreements—such as the Paris Climate Agreement, the UN New Urban Agenda, and the Leipzig Charter—states commit to obligations that are subsequently implemented at the urban and regional levels, forming the legal foundation for agglomeration development strategies. The concept of sustainable development is a cornerstone of international law in the urban context, ensuring the integration of social, economic, and environmental dimensions. This is achieved through the application of sustainability indicators (e.g., service accessibility, environmental quality, mobility), localization of global goals in urban policies, and active engagement of agglomerations in international partnerships [40].

International migration acts as a powerful demographic and sociocultural force. Global crises, wars, climate change, and economic inequality drive population movements that transform the social compo-

sition of urban agglomerations, create multicultural communities, and necessitate inclusive infrastructure, adaptation policies, and multilingual services. Urban agglomerations serve as “magnets” for global migration flows, while simultaneously facing challenges of segregation, infrastructure stress, and shifts in social dynamics.

International investment increasingly flows into urban development projects such as infrastructure, construction, digitalization, innovation hubs, waste management, and green energy. Openness to transnational capital enables agglomerations to modernize subsystems, adopt new technologies, create jobs, and strengthen economic capacity. However, it also carries risks such as dependency on external financing, rising inequality, and commercialization of urban spaces.

Global risks—including pandemics, wars, food insecurity, energy crises, and technological disruption—often manifest as sudden shocks to urban systems. Urban agglomerations are therefore compelled to develop mechanisms of strategic resilience, build reserves, establish early-warning systems, and adapt to new patterns of work, mobility, and social behavior. In response, global solidarity networks such as ICLEI and C40 Cities are emerging, promoting knowledge exchange and collective action.

Global security, in this context, includes geopolitical instability, military conflicts, terrorism, and cyber threats—all of which directly affect the stability of agglomerations. At the same time, global technologies and innovations – including artificial intelligence, smart systems, blockchain, autonomous transport, and environmental monitoring – are transforming urban economies, governance, communication, and mobility. The integration of global technological solutions allows urban agglomerations to effectively respond to 21st-century challenges, improve quality of life, and enhance global competitiveness.

Based on the research findings, a structural model of an urban agglomeration as a functional component of the socio-geosystem is proposed (Fig. 4).

The presented model of an urban agglomeration as a functional component of a socio-geosystem outlines five key types of connections that ensure interaction between its internal subsystems and the external environment. These connections reflect the complex systemic dynamics of the agglomeration, its adaptability, openness, and capacity for transformation under the influence of multi-level factors. Intrasystem connections ensure the integrity and functional unity of the urban agglomeration [41]. They link the eight core subsystems (social, economic, demographic, innovation-technological, architectural-construction, infrastructure-service, transport-logistics, and natural-ecological), facilitating their interaction, interdependence, and coordinated operation.

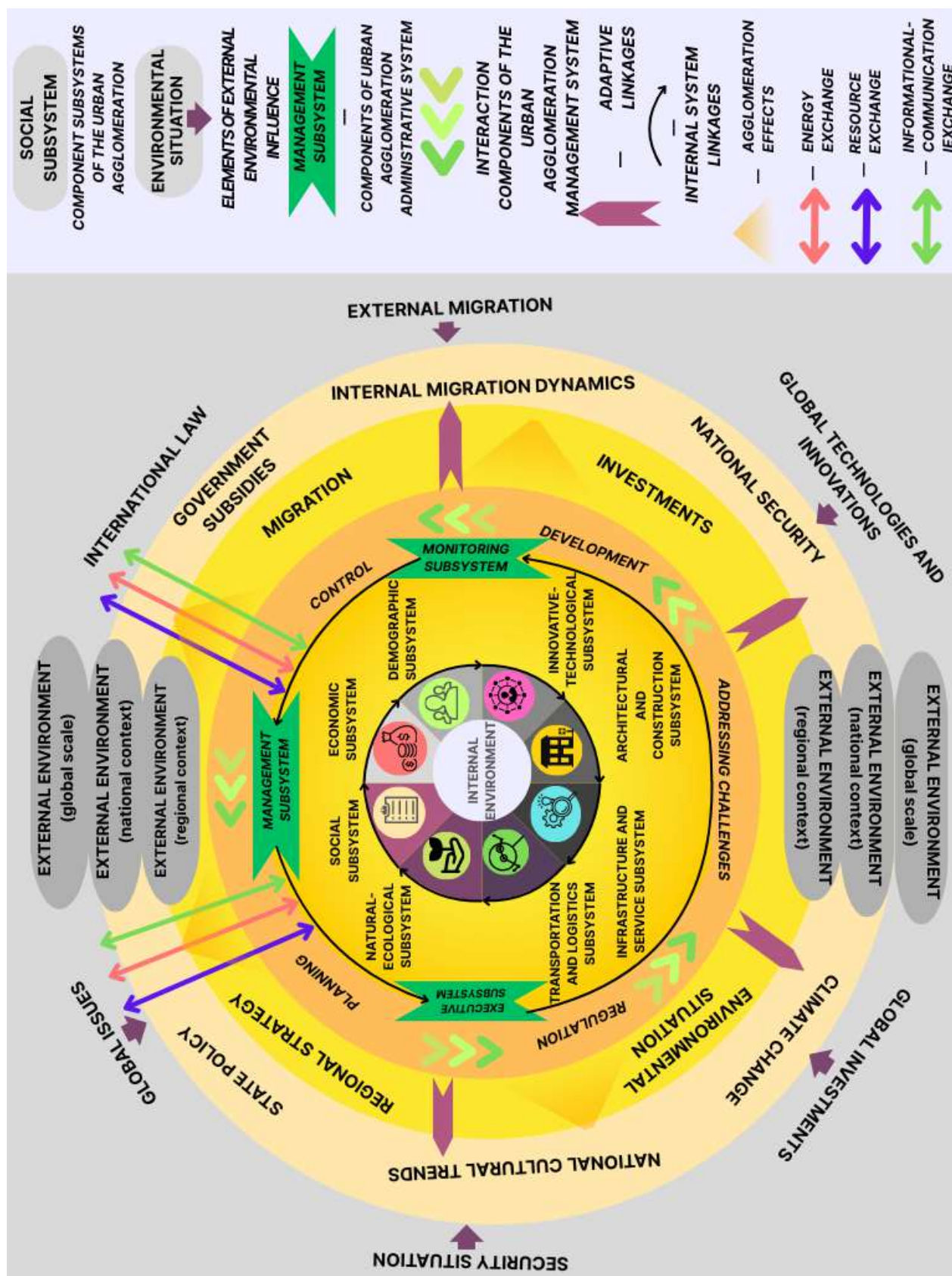


Fig. 4. Structural Model of the Urban Agglomeration as a Functional Component of the Socio-Geosystem (compiled by the author)

These connections encompass material, informational, and managerial flows, enabling the agglomeration to function as a self-regulating system. Adaptive connections link the management system with external environmental elements. They act as feedback mechanisms through which the system receives information on external changes (economic, political, environmental, social) and adjusts internal processes accordingly. Through such connections, the agglomeration remains resilient to external challenges, maintains its coherence, and ensures effective functioning even under crisis conditions [41]. Energy exchange refers to the flow of energy resources between the urban agglomeration and the external environment, including electricity, heat, and fuel supply, as well as optimization of energy use within the agglomeration. This exchange is critical for the sustainable functioning of infrastructure, transport, and production systems, and for the implementation of energy efficiency practices. Resource exchange represents the flow of material resources required to support the life of the urban agglomeration, its infrastructure, and services. This type of exchange also enables the agglomeration to act as either a donor or a recipient of resources within interterritorial networks. Information and communication exchange encompasses the transfer of knowledge, digital data, managerial and expert information, including innovation transfer, partnership communications, and participation in digital platforms and networks. This type of connection defines the intellectual and innovation potential of the agglomeration and its capacity to integrate into global information flows [41, 42]. A special role in the proposed scheme is played by agglomeration effects, which highlight the advantages of spatial concentration of population and activities—such as increased productivity, economies of scale, simplified access to labor markets, intensified innovation, and enhanced investment attractiveness. These effects strengthen the internal interaction of subsystems and also influence the agglomeration's external relations.

Discussion and Conclusions. This study proposes an analytical approach to urban agglomerations as complex, multi-level, and open organized socio-geosystems that function in dynamic interaction with the external environment and are characterized by a high degree of internal integration and adaptability. The author's structural model of the urban agglomeration presents it not merely as a spatial formation, but

as a functional system in which eight internal subsystems (social, economic, demographic, innovation-technological, architectural-construction, infrastructure-service, transport-logistics, and natural-ecological) play a central role. Their interaction forms the foundation for stability, development, and governance.

Each subsystem performs autonomous functions and acts as a component of an integrated synergistic complex, which gives rise to the agglomeration's emergent properties—its ability for self-regulation, adaptation, and development under internal and external challenges. A critical element in ensuring the system's functional integrity is the governance subsystem, comprising managerial, executive, and monitoring components. This subsystem performs planning, regulation, crisis response, sustainability maintenance, and control over developmental dynamics. An important contribution of the study is the analysis of the multi-level structure of the external environment in which the urban agglomeration operates. Regional, national, and global levels generate distinct vectors of influence, including regulatory policies, economic trends, security challenges, migration processes, cultural drivers, global technological shifts, and institutional frameworks. This multi-dimensional external landscape must be considered in agglomeration governance, particularly in the context of transitioning to a sustainable development model. The proposed model has both theoretical and practical significance. It can serve as a conceptual foundation for strategic planning of urban agglomeration development, municipal policy formation, the creation of monitoring tools, and governance systems oriented toward achieving the Sustainable Development Goals (SDGs). This framework enables the integration of spatial, functional, social, environmental, and managerial dimensions within a single system, which is particularly relevant for Ukrainian agglomerations amid post-war reconstruction, decentralization, and shifting territorial configurations. Future research should focus on developing empirical methods for quantitatively assessing types of interactions within agglomerations, establishing sustainability indicators, and adapting the model to the specifics of individual urbanized systems in Ukraine, taking into account available resources and contextual challenges.

Bibliography

1. Бабаєв, В.М. (2010). *Управління великим містом: теоретичні і прикладні аспекти: Монографія*. Харків: ХНАМГ.
2. Baldwin, R., & Forslid, R. (1998). *The core-periphery model and endogenous growth*. *Journal of Economic Geography*, 5(2), 203–228.
3. Богачов, С.В., Мельникова, М.В., Устименко, В.А. та ін. (2015). *Економіко-правові проблеми розвитку великих міст та агломерацій в Україні: Монографія*. Харків: НТМТ.

4. Биченко, Л.А. (2015). Регулювання соціально-економічного розвитку регіону з урахуванням впливу агломераційних процесів. Автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. екон. наук, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків.
5. Castells, M. (2000). *The rise of the network society* (Vol. 1). Oxford: Blackwell Publishers.
6. Christaller, W. (1966). *Central places in Southern Germany* (C. W. Baskin, Trans.). Prentice Hall. (Original work published 1933)
7. Дьомін, М.М., Сингаївська, О.І. (2015). Застосування теорії множин в дослідженні структур інформаційного забезпечення містобудівної діяльності. *Міський розвиток та територіальне планування*, 55, 3-8.
8. European soot-free city ranking at: <http://www.sootfreecities.eu/sootfreecities.eu/public/city>
9. Fang, C., & Yu, D. (2017). Urban agglomeration: An evolving concept of an emerging phenomenon. *Landscape and Urban Planning*, 162, 126–136. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.02.014>
10. Florida, R. (2002). *The rise of the creative class: And how it's transforming work, leisure, community and everyday life*. Basic Books.
11. Friedmann, J. (1986). *The world city hypothesis*. *Development and Change*, 17(1), 69–83.
12. Geddes, P. (1915). *Cities in evolution*. Williams & Norgate.
13. Gilbert, A. (1996). *Mega-city in Latin America*. United Nations University Press.
14. Haken, H. (2006). *Information and self-organization: A macroscopic approach to complex systems* (3rd ed.). Berlin–Heidelberg: Springer.
15. Hall, P. (1966). *The world cities*. London: Weidenfeld and Nicolson.
16. Höjer, M., & Wangel, S. (2015). Smart sustainable cities: Definition and challenges. In L. Hilty & B. Aebischer (Eds.), *ICT innovations for sustainability* (pp. 333–349). Springer.
17. Jacobs, J. (1992). *The death and life of great American cities*. Vintage Books.
18. Костріков, С., Серьогін, Д., & Бережний, В. (2021). Візуальний аналіз урбаністичного середовища як складова урбогеосистемного підходу. *Часопис соціально-економічної географії*, 30, 7-23. <http://dx.doi.org/10.26565/2076-1333-2021-30-01>
19. Кравченко, К. (2022). Дослідження урбанізації та міських агломерацій: вітчизняний досвід, проблеми та перспективи. *Науковий вісник Чернівецького університету: Географія*, 838, 82-99. <https://doi.org/10.31861/geo.2022.838.82-99>
20. Кравченко, К. (2022). Особливості розвитку міських агломерацій в умовах сучасної глобалізації. *Економічна та соціальна географія*, 87, 72-81. <https://doi.org/10.17721/2413-7154/2022.87.72-81>
21. Кравченко, К. Перспективи суспільно-географічного дослідження міських агломерацій: розуміння стійкості в контексті несприятливих зовнішніх впливів. *Економічна та соціальна географія*, 92, 77-92. <https://doi.org/10.17721/2413-7154/2024.92.77-92>
22. Kravchenko, K. (2024). Research of urban agglomerations from the position of a synergetic approach. *Human Geography Journal*, 37, 111–129. <https://doi.org/10.26565/2076-1333-2024-37-11>
23. Кравченко, К. О. (2022). До питання дослідження геоекологічних проблем урбанізаційних процесів у аспекті концепції стійкого розвитку. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*, 38, 6-19. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2022-38-01>
24. Кравченко, К. О., & Родіонов, В. В. (2024). Структурно-інформаційна модель міської агломерації (на прикладі Харківської агломерації). *Матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції* (м. Луцьк, 8–9 листопада 2024 р., с. 85–87). Луцьк: ФОП Мажула Ю.
25. Кравченко, К. О., Гаврікова, І. М. (2024). Особливості зовнішніх та внутрішніх міграційних процесів в Україні в умовах війни. *Регіон – 2024: Суспільно-географічні аспекти*. (с. 120–123). Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна.
26. Кравченко, К. О., Перепелиця, В. Г., & Родіонов, В. В. (2024). Дослідження міських агломерацій: міждисциплінарний підхід. *Матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції** (м. Луцьк, 8–9 листопада 2024 р., с. 88–90). Луцьк: ФОП Мажула Ю. М.
27. Кравченко, К. О., Перепелиця, В., & Шерстюк, Д. (2023). Особливості розвитку міських агломерацій: регіональний вимір. *Регіон – 2023: Стратегія оптимального розвитку*. (с. 125–131). Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна.
28. Kravchenko, K., & Shpak, Y. (2024). Comparative analysis of the transport infrastructure of the cities of Warsaw and Kharkiv as a component of the innovative development and post-war reconstruction of the cities of Ukraine. In C. Morar, L. Berman, S. Erdal, & L. Niemets (Eds.), *Achieving Sustainability in Ukraine through Military Brownfields Redevelopment* (413–428). Dordrecht: Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-024-2278-8_32
29. Кравченко, К., & Шпак, Є. (2024). Транспортна система як детермінанта просторового розвитку регіону. *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії*, (40), 58-67. <https://doi.org/10.26565/2075-1893-2024-40-07>
30. Kravchenko, K., Niemets, K., Sehida, K., Niemets, L., & Suptelo, O. (2020). Methods and approaches of determining the boundaries of agglomerations (basic case of Kharkiv region). *Human Geography Journal*, 28, 5–16. <https://doi.org/10.26565/2076-1333-2020-28-01>
31. 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. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-16>
32. Leipzig Charter (2020) at: https://city2030.org.ua/sites/default/files/documents/leipzigcharta_dt.pdf

33. Leipzig Charter: Cities of Europe on the path to sustainable development at: https://mobilitylviv.com/wp-content/uploads/2019/06/161205_Leipzig_Charta-ua.pdf
34. Лозинський, Р.М., Костюк, І.М. (2011). Сучасні межі Львівської міської агломерації. Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: Географія, 2, 55–60.
35. Маруняк, Є.О. (2016). Соціально-економічний простір (методологія геопросторових досліджень та практика планування). Автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д. геогр. наук, НАН України. Інститут географії, Київ.
36. Mezentsev, K. V., & Denysenko, O. O. (2018). Cities in the post-socialist space: Approaches to conceptualization and their place in urban discourse. *Ukrainian Geographical Journal*, 4, 16–24. <https://doi.org/10.15407/ugz2018.04.016>
37. Мезенцев, К., Олійник, Я., Мезенцева, Н. (Ред.). (2017). Урбаністична Україна: в епіцентрі просторових змін: Монографія. Київ: «Фенікс».
38. Morar, C., Lukić, T., Basarin, B., et al. (2021). Shaping sustainable urban environments by addressing the hydro-meteorological factors in landslide occurrence: Ciuperca Hill (Oradea, Romania). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(9), 5022. <https://doi.org/10.3390/ijerph18095022>
39. Niemets, K. A., Sehida, K. Yu., Niemets, L. M., Kravchenko, K. O., Telebeneva, Ye. Yu., Klyuchko, L. V., & Redin, V. I. (2019). Research of urban agglomerations in the aspect of implementing administrative-territorial reform in Ukraine (on the example of Kharkiv region). *Journal of Social and Economic Geography*, 27, 28–39. <https://doi.org/10.26565/2076-1333-2019-27-04>
40. Niemets, K., Kravchenko, K., Kandyba, Y., Kobylin, P., & Morar, C. (2021). World cities in terms of the sustainable development concept. *Geography and Sustainability*, 2(4), 304–311. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2021.12.003>
41. Нємець, К., Нємець, Л., Мезенцев, К., Сєгіда, К., Кравченко, К., Ключко, Л., Телебєнєва, Є., Кандиба, Ю., & Кобилін, П. (2023). Інформація: природа, людина, суспільство (суспільно-географічні аспекти) (Л. М. Нємець, К. В. Мезенцев, ред.). Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна.
42. Niemets, L., Kravchenko, K., Sehida, K., Telebienieva, I., & Kliuchko, L. (2022). Informational and synergetic component of human-geographical research in the scientific heritage of Kostiantyn Niemets. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (57), 153–172. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-12>
43. Pacione, M. (2009). *Urban Geography: A Global Perspective*. Routledge.
44. Палеха, Ю. М. (2020). Нова редакція Генеральної схеми планування території України – стратегія інтеграції України у європейський простір. *Український географічний журнал*, 1(109), 7–15. <https://doi.org/10.15407/ugz2020.01.007>
45. Pidhrushnyi, H. P., Marushchynets, A. V., & Ishchenko, Y. D. (2021). Kyiv metropolitan region: Issues of formation, composition, and boundaries. *Ukrainian Geographical Journal*, 4, 47–56. <https://doi.org/10.15407/ugz2021.04.047>
46. Підгрушній, Г.П., Нагірна, В.П., Фацевський, М.І., Качаєв, Ю.Д., Паши́нская, Н.Н., Денисенко, Е.А., Савчук, І.Г., Шабашова, Л.Ю., Немченко, М.П., & Бондар, В.В. (2011). Суспільно-географічні основи дослідження інтегрального потенціалу території: теоретико-методологічні підходи та досвідоцінки. *Український географічний журнал*, 3, 42–48.
47. Пітюренко, Ю.І., Якімова, М.П. (1974). Методичні питання виділення територіальних систем міських поселень і визначення їх меж. *Економічна географія*, 16, 40–47.
48. Поручинський, В. (2014). Теоретичні засади розселення населення. *Науковий вісник Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки. Економічна та соціальна географія*, 11, 89–94.
49. Prigogine, I., & Nicolis, G. (1977). *Self-Organisation in Nonequilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order through Fluctuations*. J. Wiley & Sons.
50. Пилипенко, І.О. (2015). Центро-периферійні процеси і структури в територіальній організації суспільства. Автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д. геогр. наук, Одеський національний університет ім. І.І. Мечнікова, Одеса.
51. Sassen, S. (2006). *Global city: New York, London, Tokyo*. Princeton University Press.
52. Soja, E. (2000). *Postmetropolis: Critical Studies of Cities and Regions*. Blackwell Publishers.
53. Sustainable development strategy at: <https://sustainabledevelopment.un.org/rio20>
54. Топчієв, О.Г. (2001). Основи суспільної географії: Підручник для студентів географічних спеціальностей вищих навчальних закладів. Одеса: Астропринт.
55. Шаблій, О.І. (2012). Основи загальної суспільної географії. Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка.

References

1. Babaiev, V. M. (2010). *Management of a large city: theoretical and applied aspects*. Kharkiv: KhNAMH. [in Ukrainian].
2. Baldwin, R., & Forslid, R. (1998). The core-periphery model and endogenous growth. *Journal of Economic Geography*, 5(2), 203–228.
3. Bohachov, S. V., Melnykova, M. V., & Ustylenko, V. A. (2015). *Economic and legal problems of development of large cities and agglomerations in Ukraine*. Kharkiv: NTMT. [in Ukrainian].
4. Bychenko, L. A. (2015). *Regulation of the socio-economic development of the region considering the impact of agglomeration processes*. PhD thesis abstract, Kharkiv National University of Urban Economy named after O. M. Bekeetov. Kharkiv. [in Ukrainian].
5. Castells, M. (2000). *The rise of the network society (Vol. 1)*. Oxford: Blackwell Publishers.

6. Christaller, W. (1966). *Central places in Southern Germany* (C. W. Baskin, Trans.). Prentice Hall. (Original work published 1933)
7. Domin, M. M., & Synhaivska, O. I. (2015). Application of set theory in the study of the structures of urban planning information support. *Miskiyi rozvytok ta terytorialne planuvannia*, 55, 3–8. [in Ukrainian].
8. European soot-free city ranking at: <http://www.sootfreecities.eu/sootfreecities.eu/public/city>
9. Fang, C., & Yu, D. (2017). Urban agglomeration: An evolving concept of an emerging phenomenon. *Landscape and Urban Planning*, 162, 126–136. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.02.014>
10. Florida, R. (2002). *The rise of the creative class: And how it's transforming work, leisure, community and everyday life*. Basic Books.
11. Friedmann, J. (1986). The world city hypothesis. *Development and Change*, 17(1), 69–83.
12. Geddes, P. (1915). *Cities in evolution*. Williams & Norgate.
13. Gilbert, A. (1996). *Mega-city in Latin America*. United Nations University Press.
14. Haken, H. (2006). *Information and self-organization: A macroscopic approach to complex systems* (3rd ed.). Berlin–Heidelberg: Springer.
15. Hall, P. (1966). *The world cities*. London: Weidenfeld and Nicolson.
16. Höjer, M., & Wangel, S. (2015). Smart sustainable cities: Definition and challenges. In L. Hilty & B. Aebischer (Eds.), *ICT innovations for sustainability* (pp. 333–349). Springer.
17. Jacobs, J. (1992). *The death and life of great American cities*. Vintage Books.
18. Kostrikov, S., Serohin, D., & Bereznyi, V. (2021). Visual analysis of the urban environment as a component of the urban-geosystem approach. *Chasopys sotsialno-ekonomichnoi heohrafiï*, 30, 7–23. <http://dx.doi.org/10.26565/2076-1333-2021-30-01> [in Ukrainian].
19. Kravchenko, K. (2022). Study of urbanization and urban agglomerations: national experience, problems and prospects. *Naukovyi visnyk Chernivetskoho universytetu: Heohrafiia*, 838, 82–99. <https://doi.org/10.31861/geo.2022.838.82-99>
20. Kravchenko, K. (2022). Features of the development of urban agglomerations under current globalization. *Ekonomichna ta sotsialna heohrafiia*, 87, 72–81. <https://doi.org/10.17721/2413-7154/2022.87.72-81> [in Ukrainian].
21. Kravchenko, K. (2024). Prospects for human-geographical research of urban agglomerations: understanding resilience in the context of adverse external influences. *Ekonomichna ta sotsialna heohrafiia*, 92, 77–92. <https://doi.org/10.17721/2413-7154/2024.92.77-92> [in Ukrainian].
22. Kravchenko, K. (2024). Research of urban agglomerations from the position of a synergetic approach. *Human Geography Journal*, 37, 111–129. <https://doi.org/10.26565/2076-1333-2024-37-11>
23. Kravchenko, K. O. (2022). On the study of geoeological problems of urbanization processes in the context of the concept of sustainable development. *Liudyna ta dovkillia. Problemy neoekolohii*, 38, 6–19. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2022-38-01> [in Ukrainian].
24. Kravchenko, K. O. (2024). Structural-informational model of an urban agglomeration (based on the case of Kharkiv agglomeration). In *Materials of the 9th International Scientific and Practical Conference* (Lutsk, November 8–9, 2024, 85–87). Lutsk: FOP Mazhula Yu. M. [in Ukrainian].
25. Kravchenko, K. O., & Havrikova, I. M. (2024). Peculiarities of external and internal migration processes in Ukraine under war conditions. *Rehion – 2024: Suspilno-heohrafichni aspekty*, 120–123. Kharkiv: KhNU imeni V. N. Karazina. [in Ukrainian].
26. Kravchenko, K. O., Perepelytsia, V. H., & Rodionov, V. V. (2024). Research of urban agglomerations: an interdisciplinary approach. In *Materials of the 9th International Scientific and Practical Conference* (Lutsk, November 8–9, 2024, pp. 88–90). Lutsk: FOP Mazhula Yu. M. [in Ukrainian].
27. Kravchenko, K. O., Perepelytsia, V., & Sherstiuk, D. (2023). Features of urban agglomeration development: a regional dimension. In *Region – 2023: Strategy of optimal development* (pp. 125–131). Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University. [in Ukrainian].
28. Kravchenko, K., & Shpak, Y. (2024). Comparative analysis of the transport infrastructure of the cities of Warsaw and Kharkiv as a component of the innovative development and post-war reconstruction of the cities of Ukraine. In C. Morar, L. Berman, S. Erdal, & L. Niemets (Eds.), *Achieving Sustainability in Ukraine through Military Brownfields Redevelopment* (pp. 413–428). Dordrecht: Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-024-2278-8_32
29. Kravchenko, K., & Shpak, Y. (2024). Transportna systema yak determinant prostorovoho rozvytku rehionu [The transport system as a determinant of regional spatial development]. *Problemy bezperervnoi heohrafichnoi osvity i kartohrafiï*, 40, 58–67. <https://doi.org/10.26565/2075-1893-2024-40-07> [in Ukrainian].
30. Kravchenko, K., Niemets, K., Sehida, K., Niemets, L., & Suptelo, O. (2020). Methods and approaches of determining the boundaries of agglomerations (basic case of Kharkiv region). *Human Geography Journal*, 28, 5–16. <https://doi.org/10.26565/2076-1333-2020-28-01>
31. 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. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-16>
32. Leipzig Charter (2020) at: https://city2030.org.ua/sites/default/files/documents/leipzigcharta_dt.pdf
33. Leipzig Charter: Cities of Europe on the path to sustainable development at: https://mobilitylviv.com/wp-content/uploads/2019/06/161205_Leipzig_Charta-ua.pdf

34. Lozynskyi, R. M., & Kostyuk, I. M. (2011). Current boundaries of the Lviv urban agglomeration. *Naukovi zapysky Ternopilskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Seriya: Heohrafiia*, 2, 55–60. [in Ukrainian]
35. Maruniak, Ye. O. (2016). *Socio-economic space (methodology of geospatial research and planning practice)*. Doctoral dissertation abstract, Institute of Geography, NAS of Ukraine. Kyiv. [in Ukrainian]
36. Mezentssev, K. V., & Denysenko, O. O. (2018). Cities in the post-socialist space: Approaches to conceptualization and their place in urban discourse. *Ukrainian Geographical Journal*, 4, 16–24. <https://doi.org/10.15407/ugz2018.04.016>
37. Mezentssev, K., Oliinyk, Ya., & Mezentsseva, N. (Eds.). (2017). *Urban Ukraine: In the epicenter of spatial transformations*. Kyiv: Feniks. [in Ukrainian]
38. Morar, C., Lukić, T., Basarin, B., et al. (2021). Shaping sustainable urban environments by addressing the hydro-meteorological factors in landslide occurrence: Ciuperca Hill (Oradea, Romania). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(9), 5022. <https://doi.org/10.3390/ijerph18095022>
39. Niemets, K. A., Sehida, K. Yu., Niemets, L. M., Kravchenko, K. O., Telebeneva, Ye. Yu., Klyuchko, L. V., & Redin, V. I. (2019). Research of urban agglomerations in the aspect of implementing administrative-territorial reform in Ukraine (on the example of Kharkiv region). *Journal of Social and Economic Geography*, 27, 28–39. <https://doi.org/10.26565/2076-1333-2019-27-04>
40. Niemets, K., Kravchenko, K., Kandyba, Y., Kobylin, P., & Morar, C. (2021). World cities in terms of the sustainable development concept. *Geography and Sustainability*, 2(4), 304–311. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2021.12.003>
41. Niemets, L. M., & Mezentssev, K. V. (Eds.). (2023). *Information: Nature, Human, Society (Human-Geographical Aspects)*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University.
42. Niemets, L., Kravchenko, K., Sehida, K., Telebienieva, I., & Kliuchko, L. (2022). Informational and synergetic component of human-geographical research in the scientific heritage of Kostiantyn Niemets. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (57), 153–172. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-12>
43. Pacione, M. (2009). *Urban Geography: A Global Perspective*. Routledge.
44. Palekha, Y. M. (2020). New edition of the General Scheme of Planning of the Territory of Ukraine – Strategy of integration of Ukraine in the European space. *Ukrainian Geographical Journal*, 1(109), 7–15. <https://doi.org/10.15407/ugz2020.01.007> [in Ukrainian]
45. Pidhrushnyi, H. P., Marushchynets, A. V., & Ishchenko, Y. D. (2021). Kyiv metropolitan region: Issues of formation, composition, and boundaries. *Ukrainian Geographical Journal*, 4, 47–56. <https://doi.org/10.15407/ugz2021.04.047> [in Ukrainian]
46. Pidhrushnyi, H. P., Nahirna, V. P., Fashchevskyi, M. I., Kachaev, Yu. D., Pashynskaia, N. N., Denysenko, E. A., Savchuk, Y. H., Shabashova, L. Yu., Nemchenko, M. P., & Bondar, V. V. (2011). Human-geographical foundations of integral territorial potential research: Theoretical-methodological approaches and evaluation experience. *Ukrainskyi heohrafichnyi zhurnal*, 3, 42–48. [in Ukrainian]
47. Pitiurenko, Y. I., & Yakymova, M. P. (1974). Methodological issues of delineating territorial systems of urban settlements and determining their boundaries. *Ekonomichna heohrafiia*, 16, 40–47. [in Ukrainian]
48. Poruchynskyi, V. (2014). Theoretical foundations of population settlement. *Naukovyi visnyk Shkhidnoevropeiskoho natsionalnoho universytetu imeni Lesi Ukrainky. Ekonomichna ta sotsialna heohrafiia*, 11, 89–94. [in Ukrainian].
49. Prigogine, I., & Nicolis, G. (1977). *Self-Organisation in Nonequilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order through Fluctuations*. J. Wiley & Sons.
50. Pylypenko, I. O. (2015). *Center-periphery processes and structures in the territorial organization of society*. Doctoral dissertation abstract, Odesa National University named after I. I. Mechnikov. Odesa. [in Ukrainian]
51. Sassen, S. (2006). *Global city: New York, London, Tokyo*. Princeton University Press.
52. Soja, E. (2000). *Postmetropolis: Critical Studies of Cities and Regions*. Blackwell Publishers.
53. Sustainable development strategy at: <https://sustainabledevelopment.un.org/rio20>
54. Topchiiev, O. (2001). *Fundamentals of human geography: A textbook for students of geography specialties in higher educational institutions*. Odesa: Astroprint. [in Ukrainian]
55. Shablii, O. (2012). *Fundamentals of general human geography [Osnovy zahalnoi suspilnoi heohrafi]*. Lviv: Ivan Franko LNU Publishing Center. [in Ukrainian]

Міська агломерація: суспільно-географічна концепція в перспективі сталого розвитку

Катерина Кравченко

к. геогр. н., доцент,
кафедра соціально-економічної географії і регіоналістики імені Костянтина Немця,
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, Україна;

Міські агломерації виступають складними відкритими просторово-функціональними системами, що відіграють ключову роль у соціально-економічному розвитку регіонів та країн, забезпеченні стійкості в умовах глобальних трансформацій. В умовах війни в Україні міські агломерації зазнали значного впливу, деякі трансформувались у центри прийняття внутрішньо переміщених осіб, логістичні хаби та простори опору, що зумовлює потребу у новому підході до їхнього дослідження, планування та управління їх розвитком. Метою дослідження є формування суспільно-географічної концепції міської агломерації як підсистеми соціогеосистеми, побудова авторської моделі її функціонування у взаємодії з зовнішнім середовищем та обґрунтування потенціалу сталого розвитку. У статті представлено авторську структурну модель міської агломерації як ієрархічної, динамічної системи, що включає вісім функціональних підсистем: соціальну, економічну, демографічну, інноваційно-технологічну, архітектурно-будівельну, інфраструктурно-обслуговуючу, транспортно-логістичну та природно-екологічну. Розкрито їх взаємодію, синергетичні властивості та значення для просторової єдності агломерації. Особлива увага приділена системі управління міською агломерацією, що включає керуючу, виконавчу та моніторингову підсистеми, які забезпечують адаптацію до зовнішніх викликів, реалізацію управлінських рішень та контроль за динамікою розвитку міської агломерації. Охарактеризовано три рівні зовнішнього середовища (регіональний, національний, глобальний), які здійснюють політичний, правовий, екологічний, демографічний, культурний і технологічний вплив на функціонування міської агломерації. Виокремлено п'ять типів зв'язків, що забезпечують взаємодію підсистем: внутрішньосистемні, адаптаційні, енергетичні, ресурсні та інформаційно-комунікаційні. Запропонована модель дозволяє комплексно оцінити потенціал міських агломерацій у контексті сталого розвитку, зокрема в умовах повоєнного відновлення України, та є практичним інструментом стратегічного планування і моніторингу.

Ключові слова: міська агломерація, соціогеосистема, сталий розвиток, управління, адаптивність, зовнішнє середовище.

Надійшла 7 квітня 2025 р.
Прийнята 20 травня 2025 р.

Constructing a city liveability index and evaluating the spatial pattern of liveability of Guwahati city

Anwesha Mahanta¹

Research Scholar, Department of Geography, Cotton University, Assam, India,
e-mail: anweshamahanta03@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0001-7727-7073>;

Parijat Borgohain¹

Associate Professor, Department of Geography,
e-mail: parijat.borgohain@cottonuniversity.ac.in,  <https://orcid.org/0009-0001-3546-9031>

ABSTRACT

Introduction: Urbanization is a global phenomenon on the rise in recent decades. In this context, the concept of liveability has emerged as a fundamental instrument for assessing living standards in urban areas. Currently, cities are home to 55% of the world's population, and by 2050, that number is predicted to rise to 68%. The urbanization process has been more evident in developing countries of Asia, where a significant amount of the world's population growth is occurring. However, limited studies are exploring the liveability status of cities in developing countries and the spatial pattern of liveability across the city.

The purpose of the article: The study intends to construct a city liveability index incorporating residents' perspectives. The research also evaluates the liveability of different wards of the city and identifies the factors driving the spatial pattern of liveability across the city.

Research Methods: A weighted sum methodology was used to calculate the city liveability index and weights for each indicator were determined using Principal Component Analysis (PCA). The indicators are determined through residents' perspective and a primary survey was carried out to identify and rank the key indicators of liveability.

Main findings: In the current research, it can be observed that wards located at the undulating topography have been mostly identified as low-liveable or very low-liveable wards. City growth is hampered by undulating topography because of higher expenses and challenges in infrastructural development, restrictions on land use, difficulty in road construction and the risk of landslide or erosion. The land use, distribution of amenities and spatial structure of the city is also greatly influenced by the transportation network system, which determines the movement of people and goods in the metropolitan areas. In the current context, the location of Guwahati-Shillong Road connecting the core of the city with south eastern region has been vital to the development of this part of the area.

Scientific novelty and practical implication: The research for the first time attempts to construct a city liveability index incorporating indicators based on residents' definition of liveability in Guwahati city. The findings will assist the authorities and policymakers in formulating policies emphasizing the development of low-liveable wards. Moreover, the study recommends constructing strong road connectivity which contributes towards the growth of city facilities and services in least developed wards enhancing the overall liveability of the city.

Keywords: City Liveability Index, Road Connectivity, Principal Component Analysis, Guwahati City, Spatial Pattern of Liveability.

In cites: Mahanta Anwesha, Parijat Borgohain (2025). Constructing a city liveability index and evaluating the spatial pattern of liveability of Guwahati city. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (62), 257-272. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-19>

Introduction: Currently, research and development on liveable cities has gained much attention due to the complexity and diversity of liveability standards. The construction of 'liveable cities' has become a growing policy aspiration for multiple levels of government worldwide and various international organizations such as the Sustainable Development Goals (SDGs) and the New Urban Agenda [1, 2]. This is mainly in response to the rapidly growing urbanization that poses many liveability challenges such as urban slums, poverty, exacerbating economic disparities, unsanitary conditions, poor urban infrastructure, inadequate city amenities, rising crimes and security issues [3]. The global urban population has reached 56.48 per cent in 2021 which is projected to rise to 68 per cent by 2050 [4]. As far as India is concerned population residing in urban areas is 35% in 2021 [5] and is projected to increase to 38.2% by 2036 [6]. The rapid process of urbanization has been

most pronounced in developing countries of Asia which are going through the process of messy and hidden urbanization, without effective urban planning [7]. Moreover, the ongoing urban expansion and densification add additional pressure on limited space and resources lowering cities' ability to maintain an adequate standard of living [8]. Thus, the improvement of living conditions for citizens has emerged as a major goal in city planning and management in the contemporary environment of expanding urbanisation.

The enhancement of liveable conditions requires the development of indices that are capable of providing estimates of the present conditions and assist in implementing proper urban policies and strategies. Consequently, there are numerous wide-spread liveability evaluation indices proposed for assessing the liveability of cities at the global level such as The Global Liveability Index by Economist Intelligence Unit (EIU), Mercer's Quality of Living Index and

Better Life Index (BLI) by The Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) [9,10,11].

In recent years, there have been handful of works focused on evaluating liveability by applying various indices. A study assess the performance of 14 SDGs for 56 Indian cities (separated into 6 regions) by analysing 77 variables from 2020 to 2021. Many techniques including Pearson's correlation, hierarchical clustering, data envelopment analysis and Theil index are employed to infer current status of liveability, interactions, inequality, efficiency and interrelationships between the cities [12].

Another study is conducted to analyse India's most liveable cities using the Global Liveability Index and its sociocultural, environmental, healthcare, educational and infrastructure criteria. For the survey, a mixed method approach is applied incorporating both qualitative and quantitative analyses with a targeted sample size of 100 people [13]. Patil & Sharma in 2022 also applied Principal Component Analysis (PCA) to create the Urban Quality of Life (UQoL) index using 29 indicators divided into seven components to measure the relative holistic urban development of 14 Indian cities [14]. Seven indices are produced from the seven components: 1) Index of basic amenities; 2) Index of economic development; 3) Index of safety and security; 4) Index of transportation access; 5) Index of infrastructure development; 6) Index of environmental impact and 7) Index of gender role. Thus, these studies has mainly focused on measuring relative liveability of Indian cities across different parameters. However, there are studies evaluating liveability across a city.

Saitluanga in 2014 conducted a study to identify patterns of inequality in livability in Aizawl, a rapidly expanding hill city in Northeastern India's Himalayan region [15]. The study uses the data reduction method to measure the objective and subjective dimensions of liveability at the neighbourhood level and finds that centrally located neighbourhoods are more liveable than their peripheral counterparts. However, the study only selected 6 Municipal Wards (32% of the total municipal wards) comprising of 27 local council (LC) units from central areas, middle areas and outer area. A study conducted on Madurai City, Tamil Nadu also attempt to identify spatial disparities in liveability using the Liveability Index, which was introduced by the Ministry of Urban Development, Government of India [16]. The study analyses 49 indicators divided into four pillars—institutional, social, economic, and physical. However, the study is based on only secondary data from multiple sources, including the Corporation of Madurai City.

Whereas, another study based on primary data aim at determining the subjective and objective liveability dimensions and indicators for Siliguri Muni-

cipal Corporation (SMC) [17]. The technique of stratified random sampling is used to gather the perceptions of the residents from core, semi-periphery and periphery areas, and statistical methods including Exploratory Factor Analysis (EFA) and Confirmatory Factor Analysis (CFA) is applied. But the study lacks in developing a liveability index with the selected dimensions and indicators and evaluate liveability across the city.

In addition to indexing systems academic studies have also focused on a specific liveability feature through more in-depth analytical approaches which include studies that assess the effect of weather, air pollution, and environment on livability and sustainability or studies addressing the liveability needs of a specific demographic group as the older population [18, 19, 20, 21].

Following these, several significant research gaps are identified. First of all, despite the abundance of studies on index development at bigger scales (district, regional, and national) there are limited studies specifically focusing on constructing an index at ward level. Therefore, the current study attempts to construct an index that evaluate the spatial pattern of liveable conditions across the city at ward level and determine the factors driving the spatial pattern of liveability. Moreover, there are limited research that has developed a liveability index based on indicators that adhere to the residents' definition of liveability. Thus, the research also aims to develop a city liveability index based on indicators selected through residents' perception.

The current research on liveability is conducted in a medium-class city: Guwahati. Guwahati city, one of the busiest cities in North East India, the main urban centre in Assam and home to 963,429 people has the distinction of being the primate city and dominating the urban landscape of Assam [22,23]. Although, it is one of the fastest-growing cities in India, the city has scored very poorly (48.52 on a 100-point scale) and secured 46th rank out of 49 Indian cities in the Ease of Living Index 2020 [24]. The city has flared badly on the Municipal Performance Index, 2020 among Million+ municipalities with a 51 ranking and a very poor score of 18.14 (on a 100-point scale), indicating its poor liveable conditions [25]. Using Guwahati city as a case study (Fig.1), the research attempts to develop a City Liveability Index (LCI) based on residents' opinions with the integration of Principal component analysis and also evaluate the spatial pattern of liveable conditions of the city at ward level.

Materials and methods: This section highlights the selection of indicators, collection of data and statistical techniques used to construct a composite index:

Selection of the indicators: First of all, a thor-

ough literature review is conducted to identify the key indicators of liveability. Then a set of indicators are identified as pulling indicators that attracts residents towards the city and pushing indicators of liveability that negatively impact the quality of life of residents and forces residents to move to a new place.

Primary Survey: In the next stage a primary survey is conducted using purposive random sampling. The five wards are selected purposively on the basis of their location in the city and the terrain these wards are situated on to create a sample population that includes residents from different part of the city living on different type of topography. Urban liveability is greatly influenced by the topography and its associated factors including elevation, slope and relief which affects infrastructural development, transport, accessibility, health of the environment and overall quality of life. Thus, topography was an important criteria in selecting the wards for primary survey along with their location. Then the residents for the survey from each wards are selected randomly. According to Cochran's formula, with a 95% confidence level and 7% marginal error, the minimum sample size required to represent each ward ranges from 192 to 195. Thus, a sample size of 200 residents

from each ward is finalized for the primary survey (Table No. 1).

In the survey residents are asked to rank these push and pull indicators of liveability. Moreover, they are ask to identify whether pulling indicators or pushing indicators has a greater impact on the liveable conditions of the residents. According to the results, 83.50% of the sample population considers pulling indicators are more powerful in attracting residents than the repelling force of pushing indicators. Therefore, the constructed city liveability index includes only pulling indicators of liveability. Finally, based on the ranking of the residents during the primary survey and availability of secondary data to represent these indicators 17 pulling indicators of liveability under 6 factors are selected to construct the liveability index (Table No. 2).

Secondary sources: The secondary data representing each indicator selected in the primary survey at ward level are collected from different sources as: Census 2011, Guwahati Municipality Corporation, Sentinel-2A Image downloaded from USGS and Google Earth. The thematic maps of the indicators are prepared in the ArcGIS 10.2 software and Erdas Imagine (2015) software (Fig. 2, Fig. 3 and Fig. 4).

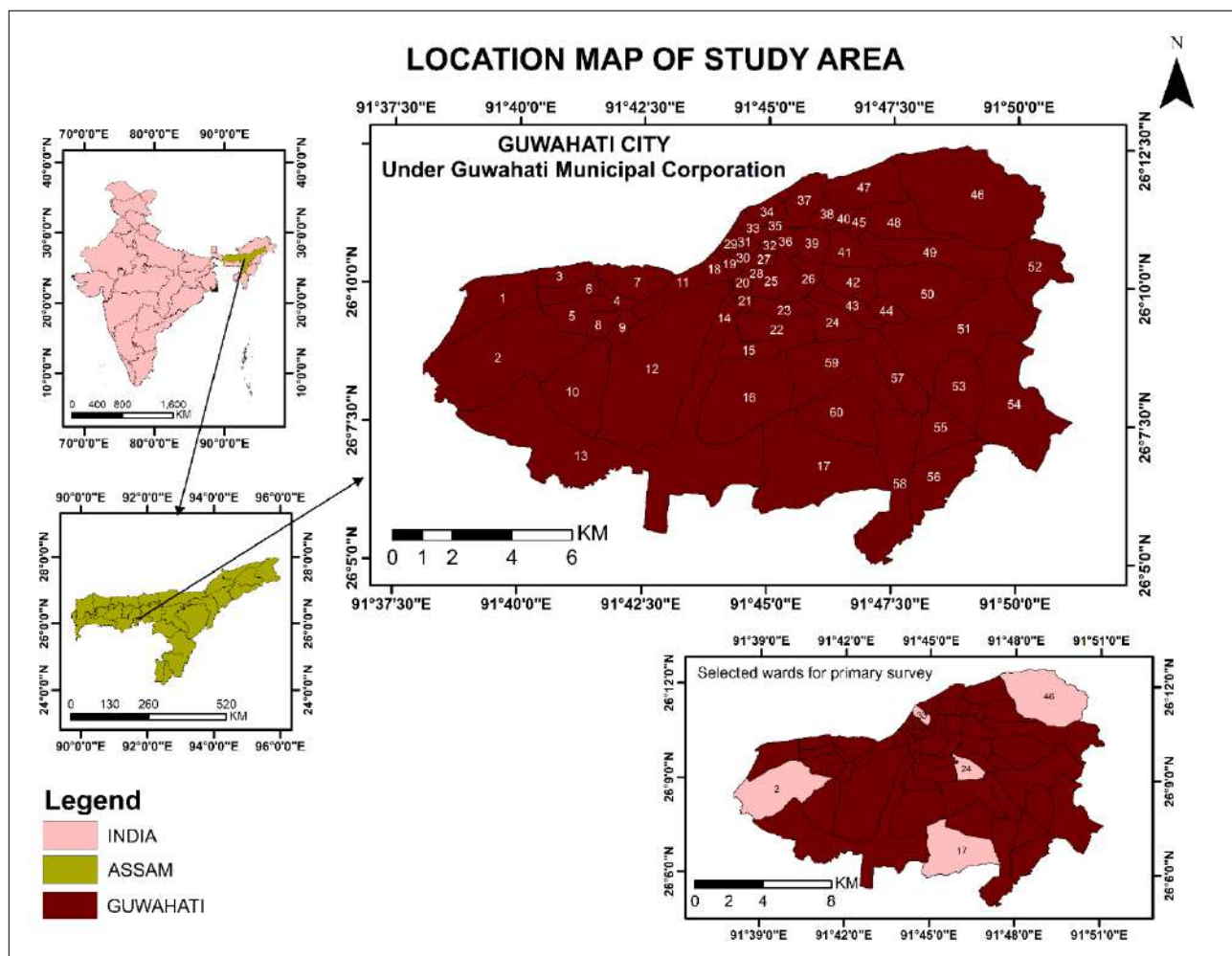


Fig. 1. Location map of the study area

Table 1

Sample population for Primary Survey

S.L No.	Ward	Total Population	Selection of wards based on location and topography	Required sample size (Based on Cochran's formula)	Sample size for primary survey
1	33	8368	Northern part of the city Plain topography	192	200
2	17	21292	Southern part of the city Plain topography	195	200
3	24	17830	Central part of the city Consist of both plain and hill topography	194	200
4	46	28309	Eastern part of the city Hill topography	195	200
5	2	16613	Western part of the city Plain topography	194	200
Total sample size					1000

Table 2

Factors and Indicators of City Liveability Index with related literature

Factors	Pulling indicators of liveability selected by residents in primary survey	Indicators: (Secondary Data representing indicators selected by residents in primary survey)	References
Housing Conditions	Liveable Houses	Percentage of households with condition of Census House as Livable	(26, 27, 28, 29)
	Electricity	Percentage of households having electricity	
	Proper Water Quality	Percentage of households having access to treated tap water for drinking purpose	
	Easy Accessibility To Water	Percentage of households having access to main source of drinking water within premises	
	Cleanliness	Percentage of households having waste water outlet connected to drainage	
	Sanitation Facilities	Percentage of households having bathing facility within the premises	
	Sanitation Facilities	Percentage of households having latrine facility within the premises	
Educational Facilities	School	Schools per 1000 persons	(29, 30, 31)
	College	Colleges per 1000 persons	
	University	Universities per 1000 persons	
Healthcare Facilities	Medical Store	Medical Stores per 1000 persons	(15, 32, 33)
	Medical Centre	Healthcare Centres / Medical Centres per 1000 persons	
	Hospital	Hospitals per 1000 persons	
Transportation Facilities	Road Density	Road Density	(28, 29, 30, 34)
	Bus Stop	Bus Stops per 1000 persons	
	Railway Station	Railway Stations per 1000 persons	
Urban Security	Police Stations	Police Stations per 1000 persons	(27, 30, 35, 36)
	Police Outposts	Police Outposts per 1000 persons	
Physical Environment	Green Space ¹	Percentage of Green Space	(27,32,37,38,39)
	Blue Space	Percentage of Blue Space	

¹ Green Blue Space is extracted from land use land cover map prepared from Sentinel-2A Image (date: 07/03/2022 downloaded from USGS Earth Explorer) using Supervised classification in Erdas Imagine Software.

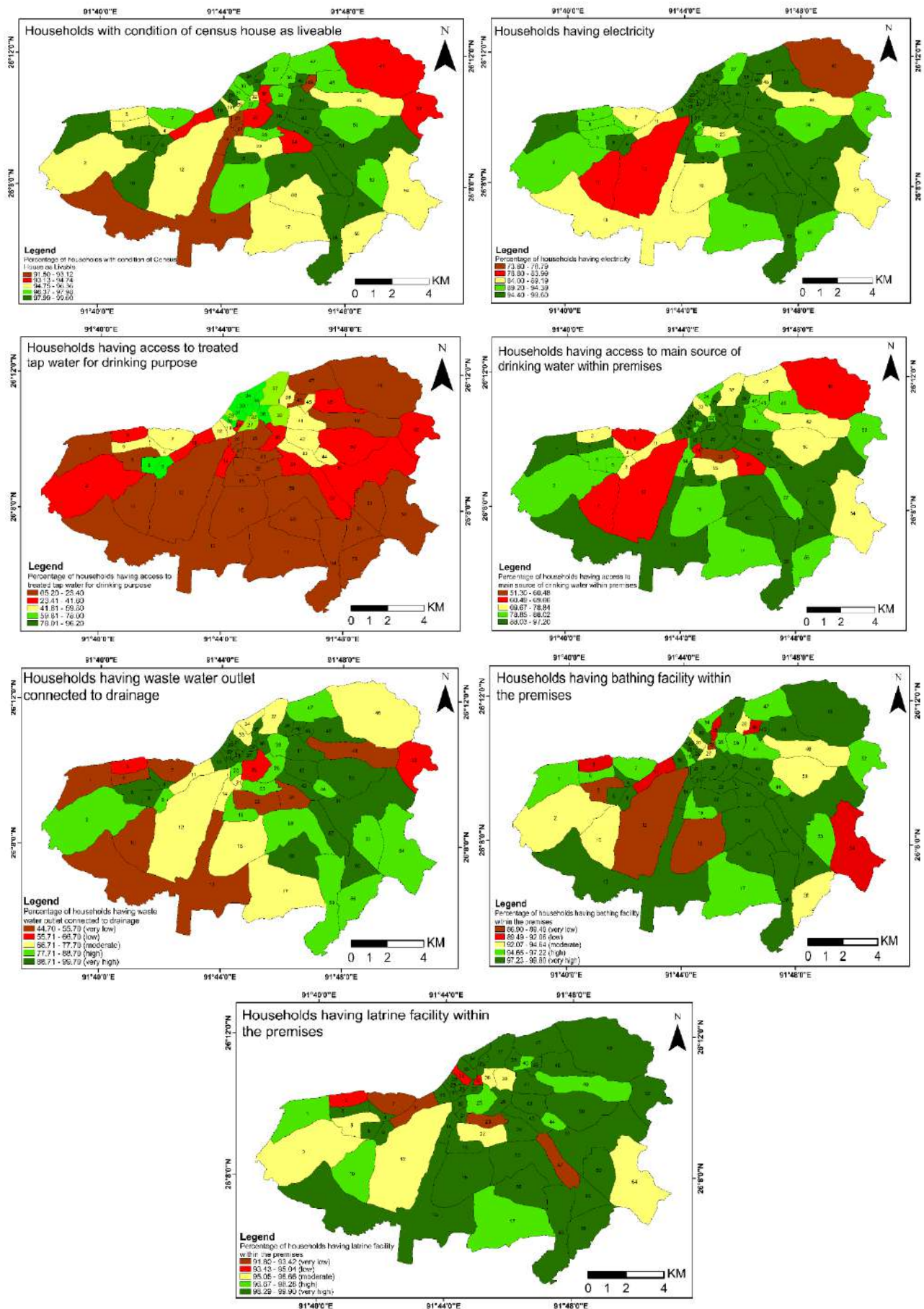


Fig. 2. Status of housing conditions of Guwahati City. *Source:* Census Data, 2011

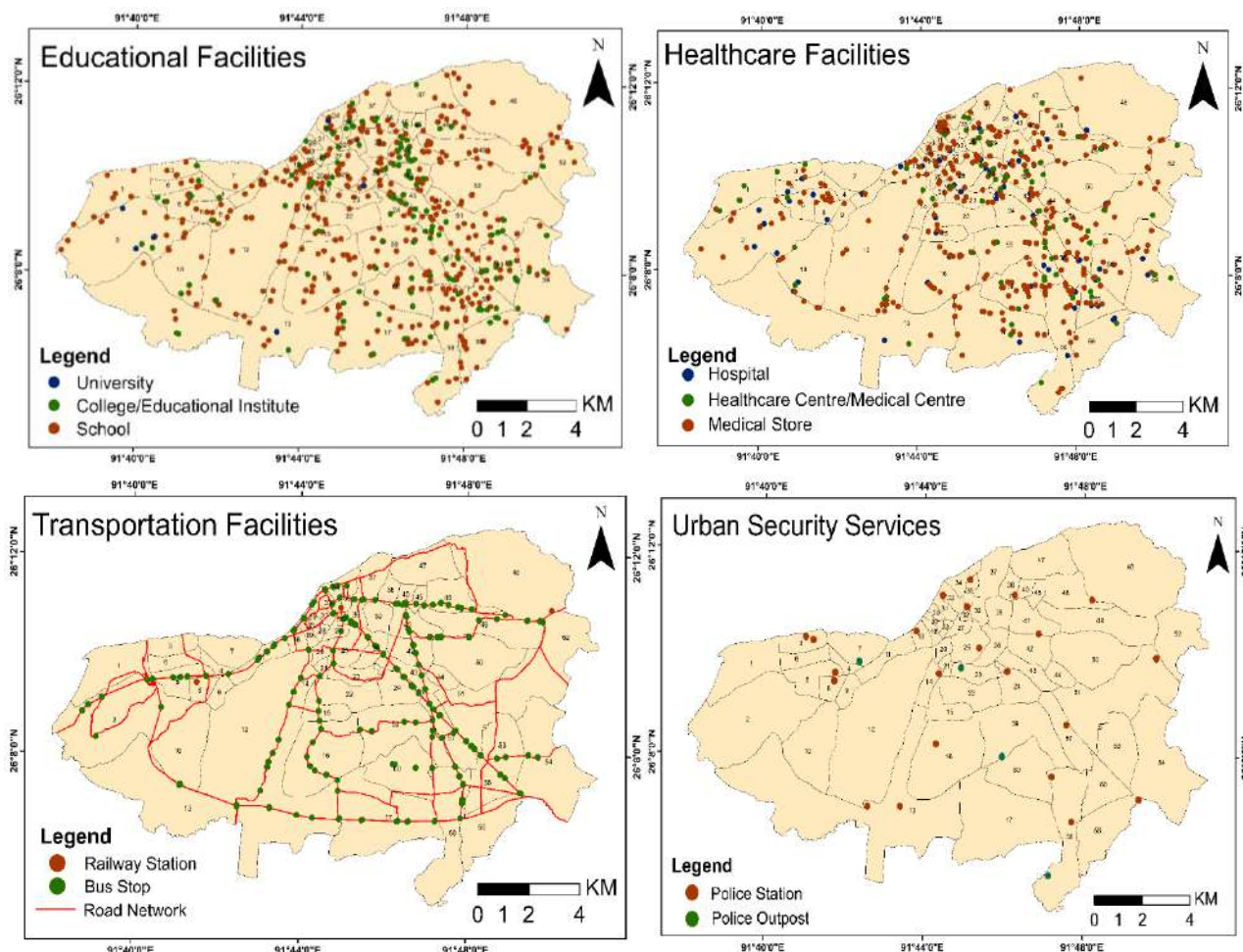


Fig. 3. Distribution of urban amenities in Guwahati City.
Source: Guwahati Municipality Corporation, 2022, Google Earth

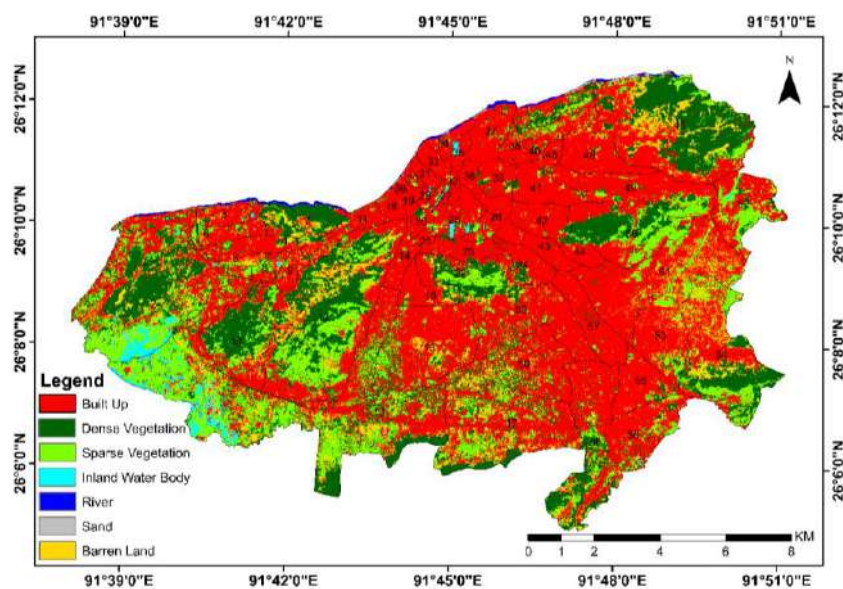


Fig. 4. Land use land cover map of Guwahati city.
Source: Sentinel-2A Image (date: 07/03/2022 downloaded from USGS Earth Explorer), Google Earth

Composite Index Construction. Principal Component Analysis (PCA) is the technique used to determine the weights of each indicator. The Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) Measure of Sampling Ade-

quacy and Bartlett's Test of Sphericity were computed to ensure that the data were suitable to run principal component analysis (PCA). The data is considered suitable for PCA if the KMO statistic is equal to

or higher than 0.50 [40]. In the present context, the value of KMO (0.622) is more than 0.5, therefore data is suitable for the application of PCA.

To run a principal component analysis, there must be correlations between the variables. As a result, a significant ($p < .001$) Bartlett's test of sphericity is required. In the present context, a value of approximate chi-square statistic is found to be 489.876 with 190 degrees of freedom, which is significant at the 0.000 level of significance. Thus, significant results of KMO and Bartlett's test show that the data is suitable for principal component analysis.

Identifying the Principal Components. To identify the number of principal components that can represent the variables the current study adopts the eigenvalue-one criterion [41]. According to the eigenvalue-one criterion, those principal components are selected which possess eigenvalues larger than 1. Thus, 7 components have been selected that possess an eigenvalue greater than 1.

For the first component, households with condition of census house as liveable, households having electricity, households having access to treated tap water for drinking purpose, households having access to main source of drinking water within premises and households having waste water outlet connected to drainage have strong positive factor loadings with 16.742% variance. This factor is a measure of housing conditions because all the five positive component loadings related to housing conditions load high on this factor.

The second component accounted for 15.915% of the variance and explains the variations in school, college, medical store, primary healthcare centre/medical centre and hospital with strong positive loadings. This factor is a well representation of basic city amenities. The third component explains 9.917 % of the variance but the interpretation of this component is less straightforward. The indicators railway station and police station load high on this component and both the indicators are services that are minimum in number and they are spatially unevenly distributed. The fourth component represents the sanitation facilities of households and measures two important indicators of sanitation facilities which are households having bathing facility within the premises and households having latrine facility within the premises with high loading component of 0.794 and 0.808 respectively.

The fifth factor accounted for 7.984% of the variance and explains the variations in police outposts with strong positive loadings. The sixth component with 7.446% of variance represents the transport infrastructure and measures the indicators road density and bus stops with 0.440 and 0.605 component loading.

The seventh component explains 7.058 % variance, representing universities and urban blue space

with component loadings 0.775 and 0.787. Both the variables are connected to one another since most of the universities are located towards the outskirts of the city in western part near to the riverine wetland Deepor Beel and they are explained by the seventh component.

Thus, the 7 principal component extracted cumulatively explain 73.566 % of variance. Thus, 20 indicators of liveability are reduced to these 7 principal components that cumulatively explain 73.566 % of the variance (Table No. 3).

Construction of the City Liveability Index:

The city liveability index was calculated using a weighted sum model [42, 43, 44]. The very first step in constructing the composite index includes the computation of component scores estimated using a regression method. A component score can be obtained as a linear combination of the standardized indicators that measure the position of a particular ward about the others concerning a particular component. However, the components do not carry the same weightage since they explain different percentage of variance. Thus, using these percentages as weights on the component scores, the city liveability index of each ward of Guwahati city based on principal component analysis was computed. Formula:

$$CL_i = \sum_{j=1}^n W_j * PCS_{ij}$$

where W_j is the contribution rate of the j th principal component (eigenvalue of j th principal component/sum of eigenvalues) and PCS_{ij} is the component score of the i th ward for the j th principal component. Finally, the computed scores of the city liveability index are scaled to a fixed range from 0 to 100 using Min-max Scaling.

Status of Liveability of Guwahati City. The liveability map of Guwahati city has been prepared with the composite scores calculated based on Principal Component Analysis (Fig. 5). The research findings distinctly highlight the influence of physical landscape on the city structure and its development. Urban studies scholars, urban planners and geographers have long attended to the influence of physical landscapes such as flat land, higher ground, steep valleys, water courses, sub-surface or surface conditions, gradients and slopes on the process of shaping the city to its present form [45]. Guwahati city sits on an undulating topography with narrow valleys and plain areas surrounded by a number of hills and wetlands (Fig. 6). These irregular features have largely influenced the current structure and development pattern of the city.

In the current research, it can be observed that wards located at the undulating topography have been mostly identified as low-liveable or very low-liveable wards (Fig. 5). The presence of Fatasil Hills

Table 3

Results of Principal Components Analysis

Indicators	Components						
	1	2	3	4	5	6	7
Percentage of households with the condition of Census House as Livable	0.560						
Percentage of households having electricity	0.670						
Percentage of households having access to treated tap water for drinking purposes	0.725						
Percentage of households having access to the main source of drinking water within the premises	0.865						
Percentage of households having waste water outlets connected to drainage	0.871						
Schools per 1000 persons		0.731					
Colleges per 1000 persons		0.665					
Medical Stores per 1000 persons		0.603					
Healthcare Centres / Medical Centres per 1000 persons		0.647					
Hospitals per 1000 persons		0.753					
Railway Stations per 1000 persons			0.756				
Police Stations per 1000 persons			0.768				
Percentage of households having bathing facilities within the premises				0.794			
Percentage of households having latrine facilities within the premises				0.808			
Police Outpost per 1000 persons					0.850		
Percentage of Green Space						-0.651	
Road Density						0.440	
Bus Stops per 1000 persons						0.605	
Percentage of Blue Space							0.787
Universities per 1000 persons							0.775
Eigen Value	3.348	3.183	1.983	1.701	1.597	1.489	1.412
Variance (%)	16.742	15.915	9.917	8.504	7.984	7.446	7.058
Cumulative Variance (%)	16.742	32.657	42.574	51.078	59.062	66.508	73.566
Extraction Method: Principal Component Analysis. Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization. ^a a. Rotation converged in 14 iterations.							

in Dhirenpara and Tetelia locality minimizes the road density in the western part, consequently limiting the growth of this part of the city. Ward numbers 12 and 10 are located at the Fatasil Hills, mostly covering the locality of Dhirenpara, Fatasil Ambari, Tetelia and few areas of Maligaon are identified as very low liveable wards and low liveable wards respectively. The hilly topography of these localities which restricts proper road connectivity with other parts of the city has restrained urban development in this area. Urban development is a composite phenomenon where several interrelated factors work to improve the standard of living of the residents of towns and cities' health [23].

Similarly, ward number 23, 22 and 21 which represents the Birubari, Fatasil Ambari and Kahilipara neighbourhoods located at the Narakasur Hills with rugged terrain and lack of connectivity are visibly deficient in providing basic city amenities and services to the residents. Ward number 16 and ward number 13 situated on Kalapahar Hills and Sonaiguli Hills are also identified as areas with poor living conditions. The western part of Ward 13 is mostly occupied by Deepor Beel and the water body acts as a barrier to the expansion of the built environment in this ward. The presence of Nilachal hills in Ward 7 and Ward 4 acts as a hindrance to its development and restrains the wards from providing proper city servi-

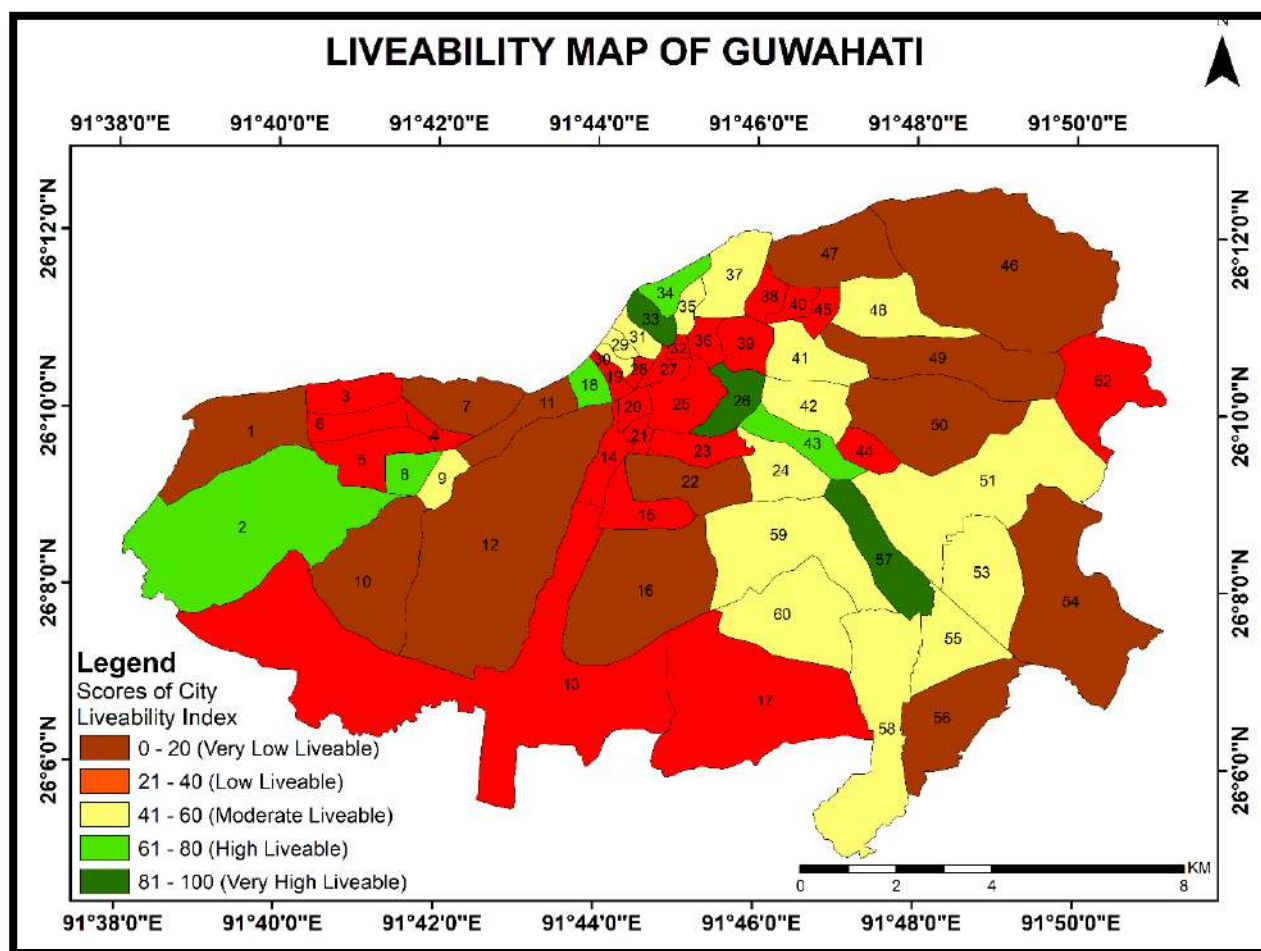


Fig. 5. Liveability map of Guwahati city based on City Liveability Index

ce to the residents.

In the eastern part of the city, wards number 46 and 52 expand over Noonmati, Kharguli Gaon, No. 2 Bonda Grant, Bonda, Kharguli NC locality and are located on the Chunsali Hills and Burha-gosain Hills along the eastern boundary of the city has scored low in the city liveability index. Similarly, Khanapara Hills and Koinadhara Hills covering Ward 54 and Ward 56 along the south-eastern boundary are identified as low-liveable wards. These wards being located on an irregular terrain and at the outskirts of the city poses a disadvantage in constructing an efficient transportation network, consequently limiting its overall development concerning city amenities, housing conditions and social functioning of the residents.

Furthermore, in the Northeastern part of the city ward numbers 49, 50, 44, 47, 38, 40 and 45 located on the Japorigog Hills and Kharguli Hills are identified as low-liveable areas. In certain wards such as ward number 46, 12 and 10 the dire situation of housing conditions is very much evident. Thus, the irregular topography of the city limits the various city services and amenities to the valley areas and plains, posing a disadvantage to the people living in surrounding hilly areas. These wards in addition to city services also fail to provide a liveable housing con-

dition and essential services including access to treated tap water within premises, adequate electricity connection and proper drainage system.

The development of unplanned settlements leading to significant land rights conflicts has forced hill dwellers to experience a number of deprivations such as inadequate waste management services, limited accessibility, and a lack of water supply, sanitation, and drainage infrastructure. The establishment of the new capital at Dispur in 1972 sparked economic growth, and the influx of people from other parts of the state into the city dramatically increased the demand for housing and land within a few decades. Thus, the historically owned properties in and around the city for generations as shared property resources by the tribal community was traded to intermediaries informally. However, after selling their properties, the aboriginal people were forced by the land market and middlemen to relocate to the hills which are considered as ecologically sensitive areas. Although the hill settlements expanded and were encroached upon by migrants and landless tribal people over time but they still struggle with access to basic household amenities since these settlements are characterized by informal structures. Therefore, the state must take an inclusive approach and resolve the land rights issue

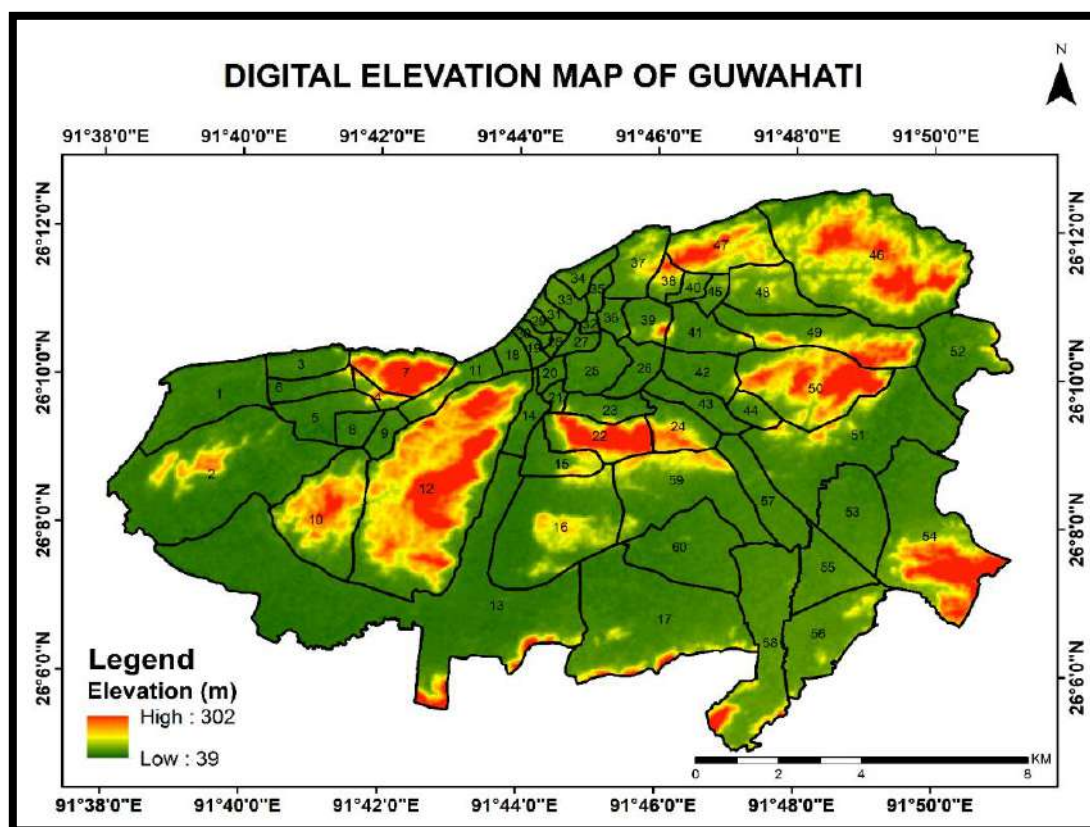


Fig. 6. Digital Elevation Map of Guwahati. *Source:* SRTM Data downloaded from USGS Earth Explorer

for the present inhabitants of hills by including them in the policy framework. However, better road connectivity and accessibility to public transportation might attract varied educational institutions, healthcare services, economic activities, and business establishments and improve liveability in these wards.

The authorities must pay attention to these low-liveable wards and strengthen their public transportation and road connectivity with other parts of the city. Additionally, the government policies must take steps to improve the housing amenities of wards that do not have adequate access to treated tap water, electricity and drainage connections. The absence of adequate urban amenities such as water supply, sanitation, sewerage, lightning, transport and affordable recreational facilities as well as efficient welfare services have been a few major challenges of the city [46].

Interestingly, most of these low-liveable wards sitting on uneven terrain offer a pleasing environment with more greenery compared to other wards. Despite being susceptible to landslides and inefficient in providing services and facilities, the wards offer benefits by enhancing the natural environment and consequently the human health of the residents.

Green infrastructure encourages physical activity by providing suitable space for walking, jogging, and running, delivers positive health impact, and offers mental and psychological relaxation, recreational

activities, and oxygen for breathing and purifying air pollutants [47, 48, 49, 50, 51, 52]. They help residents socialise, foster social interactions and integrate with the community by acting as a natural gathering place and sparking cultural events [49]. Green spaces also have the power to preserve a sustainable environment in cities and well-managed urban green spaces are thought to be more important for providing ecosystem services (freshwater, food, and raw materials) [53]. The presence of urban green areas reduces the consequences of climate change and better biophysical characteristics of canopy vegetation in urban environments contribute towards the improvement of human health [54, 55].

Thus, the policymakers must formulate urban green policies in the city and develop these wards with huge green space by generating cultural services, recreational activities, spiritual and religious services, and ecotourism along with public needs, economic opportunities and practices. Green space can be a hub for local businesses, gardens parks or community events. Providing an attractive and accessible green environment encourages urbanites to live a less sedentary lifestyle and contributes towards providing better living conditions. Aesthetically pleasing green spaces might lessen anxiety and stimulate participation in health-promoting activities [56].

Contrarily, unmaintained green spaces that offer negative visual and auditory experiences may direct-

ly affect mental health by causing feelings of dread, mistrust, increased anxiety, and concern for one's safety, thus reducing the restorative potential of green spaces [57, 58]. Moreover, poor quality or neglected greenspaces such as abandoned buildings overtaken by grasses, covered by plants and trees with roots wrapped around them may serve as locations for criminal activity and drug use [59]. Vacant lots are one sort of poor quality greenspace which are not suitable for typical uses of a greenspace such as leisure, physical activity, or socialisation [60].

Thus, authorities should make efforts to implement urban green policies that focus on developing quality green space that can offer three general functions of green spaces: reducing harm (for example, reducing exposure to air pollution, heat, and noise), restoring capacities (for example, attention restoration and physiological stress recovery), and building capacities (for example, encouraging physical activity and facilitating social cohesion) [61].

Policymakers and urban planners should take into account the opinion of the general public when developing urban green policies and generate innovative solutions to strike a balance between various competing factors, including population density, over-urbanization, the presence of slums, land use for commercial purposes, and administrative costs. An inclusive and multifaceted multi-stakeholder engagement can be crucial in overcoming competing interests and unfavourable perceptions of UGS and assist in constructing a more comprehensive policy strategy [62].

Moreover, the local government should promote a positive perception of UGS conservation, provision and use in the policy-making process to better meet the different requirements and shifting demands of urban dwellers [63]. Positive perceptions among urbanites can be generated by prioritizing urban green infrastructure benefits such as urban risk resiliency measures and human well-being benefits in future urban development. The green space infrastructure when well networked with other blue spaces can increase the city's resilience and security in terms of energy, health, water, food, and biodiversity [64].

The urban transportation system has been one of the key engines driving urban space alteration via the changing accessibility of associated land parcels, which leads to changes in land value and land use structure [65]. An urban area's urban landscape, economic activity, and multipurpose mobility have all been transformed by a complex transport network [66]. Classic theories on urban land use such as sectoral theory [67], multiple nuclei theory [68] and bid rent theory [69] all stated the significance of transportation on urban land use development. The linkages between road infrastructure and urban growth have been highlighted by different recent studies [70, 71].

The booming infrastructural development, such

as the expansion of the road network is one of the main drivers of the rapid rate of urban expansion in India. In the present context, the location of Guwahati-Shillong road towards the south-eastern part of Guwahati has played a crucial role in developing this part of the city. Guwahati-Shillong road is one of the prime commercial corridors of Guwahati that stretches from Paltan Bazar to Khanapara via Dispur (the capital of Assam) with several showrooms, brand stores, retail and wholesale developed along the main road and a densely built residential area in the inner parts in addition to being a posh address for major commercial and government buildings. Since the 2000s, Guwahati has seen an extraordinary commercial paradigm shift and G.S. Road has witnessed it all. The corridor has facilitated the expansion of Ganeshguri, a southern city sub-centre, and other southern residential areas including Hengrabari, Laxmi Nagar, Rajeeb Nagar, Dispur and Kalyani Nagar over the past few decades. GS Road further extends to connect key roads like RG Baruah Road, DR RP Road, VIP Road, Panjabari Road and Jayanagar Road.

The spatial growth of urban regions and their land use is largely influenced by the transport network system, which supports the movement of people and goods within urban areas [72]. Thus, it can be noted that wards number 26, 43 and 57 located along the GS road are highly liveable. Moreover, it can be observed that there are few wards surrounding these highly liveable areas that provide a moderate liveable condition. These wards (ward numbers: 39, 41, 42, 51, 53, 55, 58, 59, 60, 24 and 17) have well-developed road connectivity with GS road. A well-developed transit system has a significant impact on the spatial organisation, growth pattern, and economic development of a municipality area.

Thus, GS Road plays a crucial role in the overall development of the eastern part of the city. The relative accessibility, connectivity, and suitability of the transport system affect the demand for an urban area [73]. However, towards the outskirts and away from the corridor there are a few wards in the eastern part of the city as well, such as 46, 52, 54 and 56 that lack in providing suitable living conditions for the residents. Guwahati city in general has heavy traffic congestion with narrow roads, poorly managed traffic, inadequate road infrastructure and the absence of a reliable mass transit system that forces the people to rely on their vehicles. Das (2009) reported that residents are least satisfied with the traffic condition of the city among the variables associated with subjective quality of life [46].

At the extreme north few wards including wards number 33, 35, 18, 29, 30, 31, 34 and 37 with decent living conditions are the old places from where the city originated. The Guwahati city witnessed the growth of its urban settlement that started in the 8th

century with areas along the riverside [74]. Currently, these centrally located old areas like Fancy Bazar, Pan Bazar and Uzan Bazar along the Brahmaputra river still demonstrate high concentration of settlement [75]. Thus, these wards provide quality education facilities, excellent healthcare services, efficient economic services, and recreational and religious facilities with a strong transportation connectivity that connects the area with the rest of the city. These areas are crowded places with varied economic activities, administrative services, business establishments, transport and communication centres. Moreover, these wards have good housing conditions with a treated source of drinking water, proper drainage and sanitation facilities as well as better access to electricity. On the contrary, newly emerging areas including Narangi and Khanapara exhibit a dispersed settlement pattern [75] and lack efficient city services.

Ward numbers 2 and 8 located in the western part of the city are also reported as highly liveable with quality education, healthcare services, recreational facilities and a green environment. The premier educational institution Gauhati University is located in Ward 2, which aids in the development of infrastructure in that particular ward also brings revenue to the community and contributes towards the growth of housing amenities and city services. Whereas, the Northeast Frontier Railway, headquartered at Maligaon is located in Ward 8 and helps in the overall development of both the wards.

Thus, the government and policymakers must adopt urban decentralised policies to end the imbalances between wards concerning city amenities, housing conditions and transportation connectivity, to spread development evenly throughout the city. The policies must target the wards with undulating topography and improve their connectivity so that more people will be attracted to invest in those wards contribute towards the growth of amenities and uplift the economic condition of the people. Thus, improvement in economic conditions at the individual level will have a positive influence on their housing conditions.

Conclusion. The study developed a city liveability index by integrating rigorous primary surveys with statistical techniques and focus on a participatory approach where residents actively participate in selecting relevant indicators. The participatory approach will assist in comprehending liveability through the lens of the dwellers and formulate efficient policies that cater to the wants and needs of the residents, enhancing their quality of life. The proposed method for developing the index can be further applied in various study areas for evaluating liveability status. The study also aims at the spatial pattern of liveable conditions of the city at ward level and

determine the factors driving the spatial pattern of liveability. The proposed index to determine ward-level liveability disparities is also useful for neighbourhood-level urban planning and development plans. Planners can identify neighbourhoods with poor liveability scores and prioritize interventions in these wards to achieve a more equitable and balanced liveability throughout the city. The creation of development plans and targeted policies that address the unique requirements and gaps in each neighbourhood can be also guided by the proposed index and use to track the effects of development plans over time and make the required modifications. Thus, a more nuanced understanding of specific needs and priorities within a city will provide more effective solutions and improve the general quality of life of the citizens.

The findings of the study report that road connectivity is the most important factor that determines the overall liveable condition. Wards with good road connectivity contribute towards the development of proper city amenities and services as well as enhance the citizens' overall quality of life. Moreover, wards with undulating terrain have a high percentage of green space but fail to provide a good transportation network and attract investments which in turn negatively affect their development with respect to city amenities and service. Moreover, due to the complicated legal status of informal settlements in the hills and their unresolved historical land tenure the hill dwellers had been found to suffer from a variety of deprivations including poor accessibility, insufficient waste management services, and a lack of infrastructure for drainage, sanitation, and water supply displaying social inequality through spatial patterns. Fear of eviction makes them hesitant while investing in construction of pucca houses and toilets negatively impacting their livelihood, education, healthcare and leading to housing insecurities. Therefore, the state must adopt a humane strategy to address the land rights issue for the current residents of hills by incorporating them into the policy framework. Moreover, the city planners must improve the overall road connectivity of the city and pay immediate attention to low-liveable wards. The city also requires formulation of an urban greening policy to develop quality green space in the low-liveable wards for their development. Thus, the model of the zonation map and the liveability index of Guwahati can be used by the city planners to enhance the overall liveability of the city.

Acknowledgements: The researchers would like to express their gratitude for the valuable participation of all individuals who took the time to complete the survey which significantly enriched the findings of this study. The authors are thankful to the University Grants Commission (UGC), Government of India, for providing financial support in the form of Junior Research Fellowship (NTA Ref. No. 210510537994) to Anwesha Mahanta.

References

1. United Nations. (2015). Transforming our world: the 2030 agenda for Sustainable development. <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf>
2. United Nations . (2017a). New Urban Agenda. <https://habitat3.org/wp-content/uploads/NUA-English.pdf>
3. United Nations. (2017b). Rapid urbanisation: opportunities and challenges to improve the well-being of societies. Human Development Report. <https://hdr.undp.org/content/rapid-urbanisation-opportunities-and-challenges-improve-well-being-societies>
4. United Nations Conference on Trade and Development. (2022). Population. In: Handbook of Statistics, 60-70. https://unctad.org/system/files/official-document/tdstat47_en.pdf
5. World Bank. (2023). Urban population (% of total population) - India. <https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS?locations=IN>
6. National Commission on Population. (2020). Population Projections for India and states 2011 - 2036. [https://main.mohfw.gov.in/sites/default/files/Population Projection Report 2011-2036 - upload_compressed_0.pdf](https://main.mohfw.gov.in/sites/default/files/Population%20Projection%20Report%202011-2036%20-%20upload_compressed_0.pdf)
7. Kundu, D., Mueller, A., Schmidt-Seiwert, V., Binot, R., Kiel, L., & Pandey, A. (2020). Spatial Structures and Trends of Cities in Europe and Asia: A Joint Methodological Approach Based on the Global Human Settlement Layer. *Environment and Urbanization ASIA*, 11(2), 195–217. <https://doi.org/10.1177/0975425320958850>
8. Sheikh, T. W & Ameijde, J. (2022). Promoting livability through urban planning: A comprehensive framework based on the “theory of human needs.” *Cities*, 131, 103972. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.103972>
9. Economist Intelligence .(2024). Global Liveability Index 2024 The world's most liveable cities. <https://livewirecalgary.com/wp-content/uploads/2024/06/The-Global-Liveability-Index-Summary-Report-final.pdf>
10. Mercer. (2025). Quality of living. Global mobility locations: Coverage. <https://mobilityexchange.mercer.com/Portals/0/Content/Coverage/Global-Mobility-Reports-Coverage.pdf#page=23>
11. The Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). (2020). How's Life? 2020: Measuring Well-being, OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/9870c393-en>
12. Roy, A., Garai, N., & Biswas, J.K. (2023). Exploration of urban sustainability in India through the lens of sustainable development goals. *Discover Sustainability*, 4 (41). <https://doi.org/10.1007/s43621-023-00158-2>
13. Bharat, A. & Chadchan, J. (2024). Citizens' Perception on Livability in Indian Metropolitan Cities. *Urban Social Work*. <https://doi.org/10.1891/USW-2023-0018>
14. Patil, G.R., & Sharma, G. (2022). Urban Quality of Life: An assessment and ranking for Indian cities. *Transport Policy*, 124. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.11.009>
15. Saitluanga, B.L. (2014). Spatial Pattern of Urban Livability in Himalayan Region: A Case of Aizawl City, India. *Social Indicator Research*, 117. 541–559. <https://doi.org/10.1007/s11205-013-0362-3>
16. Parvathy, M.R & Manonmani, I.K. (2025). Assessing Urban Livability: A Case Study of Madurai City Using the Indian Liveability Index. *GeoJournal* 90, 46. <https://doi.org/10.1007/s10708-025-11286-9>
17. Adhikari, A.K. & Roy, T.B. (2021). Latent factor analysis and measurement on sustainable urban livability in Siliguri Municipal Corporation, West Bengal through EFA and CFA model. *Computational Urban Science*, 1(23). <https://doi.org/10.1007/s43762-021-00023-w>
18. Fan, Z., Wang, Y., & Feng, Y. (2021). Ecological Livability Assessment of Urban Agglomerations in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(24). <https://doi.org/10.3390/ijerph182413349>
19. Jun, S., Li, M., & Jung, J. (2022). Air Pollution (PM2.5) Negatively Affects Urban Livability in South Korea and China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 9(20):13049. <https://doi.org/10.3390/ijerph19201304>
20. Shi, C., Guo, N., Zeng, L., & Wu, F. (2022). How climate change is going to affect urban livability in China. *Climate Services*, 26 , 100284. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2022.100284>
21. Zhang, X., Warner, M., & Firestone, S. (2019). Overcoming Barriers to Livability for All Ages: Inclusivity Is the Key. *Urban Planning*, 4(2), 31-42. <https://doi.org/10.17645/up.v4i2.1892>
22. Census . (2011a). Primary Census Abstract Total Table. <https://censusindia.gov.in/pca/>
23. Chetry, R., Kar, B. K. (2018). Urbanisation to Urbanism understanding the pattern of Urban Development in Assam (Doctoral Dissertation, Gauhati University). Shodhganga. <http://hdl.handle.net/10603/267707>
24. Kapoor, A., Yadav, C., M., Duttaa A., Sharma D., & Sinha, H. (2021). Ease of Living Index 2020 : Ministry of Housing and Urban Affairs. https://smartnet.niua.org/sites/default/files/resources/final_web_ease_of_living_report_2020_.pdf
25. Kapoor, A., Yadav, C., M., Duttaa A., Sharma D., & Sinha, H. (2021).Municipal Performance Index : Ministry of Housing and Urban Affairs. https://smartnet.niua.org/sites/default/files/resources/final_web_mpi_report_2021.pdf
26. Badland, H., Whitzman, C., Lowe, M., Davern, M., Aye, L., Butterworth, I., Hes, D., & Giles-Corti, B. (2014). Urban liveability: Emerging lessons from Australia for exploring the potential for indicators to measure the social determinants of health. *Social Science and Medicine*, 111, 64–73. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2014.04.003>
27. Higgs, C., Badland, H., Simons, K., Knibbs, L. D., & Corti, B. G. (2019). The Urban Liveability Index : developing a policy - relevant urban liveability composite measure and evaluating associations with transport mode choice. *International Journal of Health Geographics*, 18, (14). <https://doi.org/10.1186/s12942-019-0178-8>
28. Davern, M., Both, A., Murray, K., Roberts, R., & Davern, M. (2023). Liveability research creating real world impact : connecting urban planning and public health through the Australian Urban Observatory public health through the Australian Urban Observatory. *Cities & Health*. <https://doi.org/10.1080/23748834.2023.2178091>

29. Chi, Y. L., Wai, H., & Mak, L. (2021). From Comparative and Statistical Assessments of Liveability and Health Conditions of Districts in Hong Kong towards Future City Development. *Sustainability*, 13(16), 8781. <https://doi.org/10.3390/su13168781>
30. Suptelo, O., & Sehida, K. (2020). Factors of Post-Industrial Transformations of Urban Sociogeosystems (Case Kharkiv). *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology, Geography Ecology*, (53). 194-205. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-53-15>
31. Onnom, W., Tripathi, N., Nitivattananon, V., & Ninsawat, S. (2018). Development of a Liveable City Index (LCI) Using Multi Criteria Geospatial Modelling for Medium Class Cities in Developing Countries. *Sustainability* 10 (2), 520. <https://doi.org/10.3390/su10020520>
32. Alderton, A., Davern, M., Nitvimol, K., Butterworth, I., Higgs, C., Ryan, E., & Badland, H. (2019). What is the meaning of urban liveability for a city in a low-to-middle-income country? Contextualising liveability for Bangkok, Thailand. *Globalization and Health*, 15(1), 1–14. <https://doi.org/10.1186/s12992-019-0484-8>
33. Cui, H., Fang, H., Tian, Y., Zheng, W., Li, W., & Tian, W. (2022). Evaluation of Livability of Wuhan under Ecological Construction and Analysis of Its Spatial Pattern. *Sustainability* 2022, 14(18). <https://doi.org/10.3390/su141811283>
34. Kostrikov, S. V., Niemets, L. M., Sehida, K. Y., Niemets, K. A., & Morar, C. (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), 107-124. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2018-49-09>
35. Pan, L., Zhang, L., Qin, S., Yan, H., Peng, R., & Li, F. (2021). Study on an Artificial Society of Urban Safety Livability Change. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 10(2):70. <https://doi.org/10.3390/ijgi10020070>
36. Lihu, P., Xiaowen, L., Shipeng, Q., Yingjun, Z., & Huimin, Y. (2020). A multi-agent model of changes in urban safety livability. *Simulation*, 96(6), 519–535. <https://doi.org/10.1177/0037549719898762>
37. Wolff, M., & Haase, D. (2019). Mediating Sustainability and Liveability – Turning Points of Green Space Supply in European Cities. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 61. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00061>
38. Reyes-riveros, R., Altamirano, A., La, F. De, Vieli, L., Meli, P., & Rozas-v, D. (2021). Linking public urban green spaces and human well-being: A systematic review. *Urban Forestry & Urban Greening*, 61, 127105. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127105>
39. Tate, C., Hunter, R., Wang, R., Akaraci, S., Burns, C., Garcia, L., & Clarke, M. (2022). The Contribution of Urban Green and Blue Spaces to the United Nation's Sustainable Development Goals: An Evidence Gap Map. SSRN. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4264138>
40. Cerny, B. A., & Kaiser, H. F. (1977). A Study Of A Measure Of Sampling Adequacy For Factor- Analytic Correlation Matrices. *Multivariate Behavioral Research* 12(1): 43-7. <https://doi.org/10.1207/s15327906mbr1201>
41. Kaiser, H. F. (1960). The Application of Electronic Computers to Factor Analysis. *Educational and Psychological measurement*. 10(1).
42. Hightower, W.L. (1978) Development of an Index of Health Factor Analysis. *Medical Care*. 16(3). <https://doi.org/10.1097/00005650-197803000-00006>
43. Antony, G. M. A., & Rao, K. V. (2007). A composite index to explain variations in poverty , health , nutritional status and standard of living: Use of multivariate statistical methods. *Public Health*, 121 (8) 578–587. <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2006.10.018>
44. Mateo, J.R.S.C. (2012). Weighted Sum Method and Weighted Product Method. In: *Multi Criteria Analysis in the Renewable Energy Industry*. Green Energy and Technology. Springer, London. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2346-0_4
45. Branch, M. C. (1951). Physical Aspects of City Planning. *ANNALS of the Association of American Geographers*. 41(4), 269–284. <https://doi.org/10.2307/2561069>
46. Das, D. (2009). *Quality of life and environment* (Doctoral Dissertation). Indian Institute Technology Guwahati. <http://gyan.iitg.ernet.in/handle/123456789/267>
47. Hunter, R. F., Cleland, C., Cleary, A., Droomers, M., Wheeler, B. W., Sinnett, D., Nieuwenhuijsen, M. J., & Braubach, M. (2019). Environmental , health , wellbeing , social and equity effects of urban green space interventions : A meta-narrative evidence synthesis. *Environment International*, 130, 104923. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104923>
48. Morar, C., Lukić, T., Valjarević, A., Niemets, L., Kostrikov, S., Sehida, K., Telebienieva, I., Kliuchko, L., Kobylin, P., & Kravchenko, K. (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>
49. Jabbar, M., Mohd, M., & Aziz, Y. (2022). Assessing the role of urban green spaces for human well- being : a systematic review. *GeoJournal*, 87(5), 4405–4423. <https://doi.org/10.1007/s10708-021-10474-7>
50. Labib, S. M., Lindley, S., & Huck, J. J. (2020). Spatial Dimensions of the Influence of Urban Green-Blue Spaces on Human Health: A Systematic Review. *Environmental Research*, 180, 108869. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108869>
51. Sanders, T., Feng, X., Fahey, P. P., Lonsdale, C., & Astell-burt, T. (2015). The influence of neighbourhood green space on children 's physical activity and screen time : findings from the longitudinal study of Australian children. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*. <https://doi.org/10.1186/s12966-015-0288-z>
52. World Health Organization (2016). *Urban Green Space and Health : Intervention Impacts and Effectiveness*. https://cdn.who.int/media/docs/librariesprovider2/euro-health-topics/environment/2017-urban-green-space-and-health.pdf?sfvrsn=84b82579_1&download=true

53. Vargas-Hernández, J.G., Pallagst, K., Zdunek-Wielgolaska, J. (2018). Urban Green Spaces as a Component of an Ecosystem. In: Marques, J. (eds) *Handbook of Engaged Sustainability*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71312-0_49
54. Krellenberg, K., Welz, J., & Reyes-päcke, S. (2014). Urban green areas and their potential for social interaction e A case study of a socio-economically mixed neighbourhood in Santiago de Chile. *Habitat International*, 44, 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2014.04.004>
55. Wolf, K. L., Lam, S. T., Mckeen, J. K., Richardson, G. R. A., Bosch, M. Van Den, & Bardekjian, A. C. (2020). Urban Trees and Human Health: A Scoping Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 17(12), 4371. <https://doi.org/10.3390/ijerph17124371>
56. Barton, J., & Rogerson, M. (2017). The importance of greenspace for mental health. *British Journal of Psychiatry International*, 14(4), 79–81. <https://doi.org/10.1192%2Fs2056474000002051>
57. Nilsson, M. E. (2013). Effects of Sounds from Water on Perception of Acoustic Environments Dominated by Road-Traffic Noise. *Acta Acustica united with Acustica*, 99(2). <https://doi.org/10.3813/AAA.918605>
58. Hoffmann, E., Barros, H., & Ribeiro, A. I. (2017). Socioeconomic Inequalities in Green Space Quality and Accessibility – Evidence from a Southern European City. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 14 (8). <https://doi.org/10.3390/ijerph14080916>
59. Groff, E., & Mccord, E. S. (2012). The role of neighborhood parks as crime generators. *Security Journal*, 25, 1–24. <https://doi.org/10.1057/sj.2011.1>
60. Sivak, C. J., Pearson, A. L., & Hurlburt, P. (2021). Landscape and Urban Planning Effects of vacant lots on human health : A systematic review of the evidence. *Landscape and Urban Planning*, 208, 104020. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.104020>
61. Markevych, I., Schoierer, J., Hartig, T., Chudnovsky, A., Hystad, P., Dzhambov, A. M., Vries, S. De, Triguero-mas, M., Brauer, M., Nieuwenhuijsen, M. J., Lupp, G., Richardson, E. A., Astell-burt, T., Dimitrova, D., Feng, X., Sadeh, M., Standl, M., Heinrich, J., & Fuertes, E. (2017). Exploring pathways linking greenspace to health : Theoretical and methodological guidance. *Environmental Research*, 158, 301–317. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.06.028>
62. Sreetheran, M. (2017). Exploring the urban park use, preference and behaviours among the residents of Kuala Lumpur , Malaysia. *Urban Forestry & Urban Greening*, 25, 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.05.003>
63. Jim, C. Y., & Shan, X. (2013). Socioeconomic effect on perception of urban green spaces in Guangzhou , China. *Cities*, 31, 123–131. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2012.06.017>
64. Mukherjee, M., & Takara, K. (2018). Urban green space as a countermeasure to increasing urban risk and the UGS-3CC resilience framework. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 28, 854-861. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.01.027>
65. Zhang, S., Li, C., Ma, Z. & Li X (2020). Influences of Different Transport Routes and Road Nodes on Industrial Land Conversion : A Case Study of Changchun City of Jilin Province. *Chinese Geographical Science* 30, 544–556. <https://doi.org/10.1007/s11769-020-1126-z>
66. Saddique, N., Jehanzaib, M., Sarwar, A., Ahmed, E., Muzammil, M., Khan, M. I., Faheem, M., Buttar, N. A., Ali, S., & Bernhofer, C. (2022). A Systematic Review on Farmers' Adaptation Strategies in Pakistan toward Climate Change. *Atmosphere*, 13(8), 1–15. <https://doi.org/10.3390/atmos13081280>
67. Homer Hoyt. (1939). *The Structure and Growth of Residential Neighborhoods in American Cities* Washington, Federal Housing Administration. <https://archive.org/details/structuregrowth00unitrich/page/n7/mode/2up?ref=ol&view=theater>
68. Harris, C. D., & Ullman, E. L. (1945). The Nature of Cities. *The ANNALS of the American Academy of Political and Social Science*, 242(1), 7–17. <https://doi.org/10.1177/000271624524200103>
69. Alonso, W. (1964). *Location and Land Use. Toward a General Theory of Land Rent*. Cambridge: Harward University Press. <http://dx.doi.org/10.4159/harvard.9780674730854>
70. Pradhan, R. P., Arvin, M. B., & Nair, M. (2021). Urbanization, transportation infrastructure, ICT, and economic growth : A temporal causal analysis. *Cities*, 115, 103213. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2021.103213>
71. Saikia, A., Kar, B. K. (2023). Impact of road connectivity on urbanisation: a case study of Central Brahmaputra Valley, Assam, India. *GeoJournal*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1007/s10708-023-10843-4>
72. Wang, Z., Han, Q. & de Vries, B. (2019). Land Use/Land Cover and Accessibility: Implications of the Correlations for Land Use and Transport Planning. *Applied Spatial Analysis and Policy*, 12, 923–940. <https://doi.org/10.1007/s12061-018-9278-2>
73. Tyrinopoulos, Y., Antoniou, C. (2013). Factors affecting modal choice in urban mobility. *European Transport Research Review*, 5, 27–39. <https://doi.org/10.1007/s12544-012-0088-3>
74. Hemani, S., & Das, A. K. (2016). City profile: Guwahati. *Cities*, 50, 137–157. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2015.08.003>
75. Pawe, C. K., & Saikia, A. (2020). Decumbent development: Urban sprawl in the Guwahati Metropolitan Area, India. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 41(2), 226–247. <https://doi.org/10.1111/sjtg.12317>

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Побудова індексу життєздатності міста та оцінка просторової моделі життєздатності міста Гувахаті

Анвеша Маханта ¹

наук. співробітник кафедри географії географічного факультету,

¹ Університет Коттон, Ассам, Індія;

Паріджат Боргохайн ¹

доктор філософії, доцент кафедри географії

Урбанізація – це глобальне явище, яке зростає в останні десятиліття. У цьому контексті концепція придатності для проживання стала основним інструментом для оцінки рівня життя в містах. Зараз у містах проживає 55% населення світу, а до 2050 року прогнозується, що це число зросте до 68%. Процес урбанізації був більш очевидним у країнах Азії, що розвиваються, де відбувається значне зростання населення світу. Однак обмежені дослідження вивчають статус придатності для життя в містах у країнах, що розвиваються, і просторову структуру придатності для життя в місті. Дослідження має на меті побудувати індекс життєздатності міста, враховуючи точки зору мешканців. Дослідження також оцінює придатність для життя в різних районах міста та визначає фактори, що впливають на просторову структуру придатності для життя в місті. Методологія зваженої суми була використана для розрахунку індексу комфортності міста, а ваги для кожного показника були визначені за допомогою аналізу основних компонентів (РСА). Показники визначаються з точки зору мешканців, і було проведено первинне опитування для визначення та ранжирування ключових показників придатності для життя. У поточному дослідженні можна помітити, що палати, розташовані на хвилястому рельєфі, були здебільшого визначені як райони з низьким рівнем або дуже низьким рівнем придатності для проживання. Зростанню міста перешкоджає хвилястий рельєф через вищі витрати та проблеми в розвитку інфраструктури, обмеження на землекористування, труднощі з будівництвом доріг і ризик зсувів або ерозії. На землекористування, розподіл зручностей і просторову структуру міста також значною мірою впливає система транспортної мережі, яка визначає рух людей і товарів у столичних районах. У поточному контексті розташування дороги Гувахаті-Шиллонг, що з'єднує центр міста з південно-східним регіоном, було життєво важливим для розвитку цієї частини району. Дослідження вперше намагається побудувати індекс життєздатності міста, що включає показники, засновані на визначенні жителями життєздатності міста Гувахаті. Отримані результати допоможуть органам влади та політикам у розробці політики, що наголошуватиме на розвитку районів з низьким рівнем життя. Крім того, дослідження рекомендує побудувати міцне дорожнє сполучення, яке сприятиме зростанню міських об'єктів і послуг у найменш розвинених районах, покращуючи загальну зручність життя в місті.

Ключові слова: індекс життєздатності міста, зв'язок доріг, аналіз основних компонентів, місто Гувахаті, просторова структура придатності для життя.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 19 квітня 2025 р.

Прийнята 25 травня 2025 р.

Аналіз і оцінка граничних інтенсивностей формування максимального стоку води річок правобережжя та лівобережжя Дністра

Станіслав Москаленко

к. геогр. н., асистент, кафедра гідрології та гідроекології,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна,
e-mail: stanislavmoskalenko@knu.ua,  <https://orcid.org/0000-0003-0644-5046>

У статті подано результати дослідження максимального стоку води річок щодо проявів найбільшої інтенсивності процесів його формування. Розглядалися річки правобережної (Карпатської) і лівобережної (Подільської) частин басейну р. Дністер. За матеріалами даних багаторічних спостережень Державної гідрометеорологічної служби ДСНС України створено вибірку найбільших річних максимальних витрат води із 44 гідрометричних постів на річках. Для можливості просторового порівняння зазначені витрати перераховано в максимальні модулі стоку, оскільки ця характеристика стоку дає можливість оцінити інтенсивність формування стоку води в річковому басейні. Тривалість періодів спостережень на 59 % постів складала >60 років, на 32 % - 50-60 років і лише на 9% постів спостереження < 50 років. Оскільки періоди спостережень різні, визначено аналітичні значення максимумів повторюваністю 1 раз в 100 років (1 % забезпеченості). Для розрахункових цілей емпіричний розподіл апроксимовано аналітичним розподілом Пирсона III типу. Для правобережної і лівобережної частин басейну р. Дністер виявлено та узагальнено закономірності просторової мінливості проявів найбільшої інтенсивності процесів формування максимального стоку води. Для цього встановлено зв'язки між максимальними модулями стоку води (л/с·км²) в окремих створах річок 1 % забезпеченості від відповідних площ (км²) їх басейнів. На основі їх аналізу чітко прослідковується, що яскравими проявами граничної інтенсивності формування максимального стоку на річках відзначаються малі й елементарні водозбори, які й відображають максимальні можливості природи до формування стоку води річок в досліджуваному регіоні. За проведеними розрахунками максимальні модулі стоку води з елементарних водозборів правобережної (Карпатської) частини басейну р. Дністер площею 2-10 км² можуть досягати 7500-4500 л/с·км², а площею 10-20 км² – 4500-3500 л/с·км². Для лівобережної (Подільської) частини басейну р. Дністер інтенсивності процесів формування максимального стоку води менші - з елементарних водозборів площею 2-10 км² максимальні модулі стоку води можуть досягати 3200-1500 л/с·км², площею 10-20 км² – 1500-1000 л/с·км².

Ключові слова: р. Дністер, річки правобережної і лівобережної частин басейну, максимальний стік води, гранична інтенсивність формування стоку.

Як цитувати: Москаленко Станіслав (2025). Аналіз і оцінка граничних інтенсивностей формування максимального стоку води річок правобережжя та лівобережжя Дністра. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (62), 273-286. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-20>

In cites: Moskalenko Stanislav (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> [in Ukrainian]

Постановка проблеми. Максимальний стік води річок, з одного боку, відноситься до екстремальних показників їх водного режиму, який слугує найвищою мірою небезпеки для населення та економіки і може обумовити різні прояви катастрофічних ситуацій (затоплення територій, населених пунктів, руйнування мостів, будівель, гідротехнічних споруд тощо), а з іншого – природне явище, що відображає максимальний потенціал природи щодо його формування в межах річкового басейну чи певної території.

Мета даного дослідження – виявлення та узагальнення закономірностей просторової мінливості проявів найбільшої інтенсивності процесів формування максимального стоку води річок окремо для правобережної і лівобережної частин басейну р. Дністер, розрахунок граничних інтенсивностей з приведенням до певних водозбірних площ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Загалом, максимальний стік води річок завжди викликав і наразі викликає достатньо великий інтерес вітчизняних і закордонних вчених-гідрологів. При цьому він досліджувався і досліджується в різноманітних теоретичних та практичних напрямках та аспектах. Тут треба згадати низку українських гідрологів минулого століття – А. В. Огієвського, А. М. Бефані, Г. І. Швеця, В. І. Мокляка, П. Ф. Вишневецького, Й. А. Железняка, Я. О. Фоменка, А. І. Шерешевського, Є. Д. Гопченка, В. М. Бойко, М. М. Сусідка, М. І. Кирилюка [1, 6, 10, 11, 20-23, 26, 32], які всебічно присвячувати себе вивченню процесів та умов формування максимального стоку води паводків і весняного водопілля на рівнинних та гірських водозборах, обґрунтовуванню та розробленню методів та методик їх розрахунку та прогнозу. В подальшому, накопичення даних гідрометричних спостережень,

цебто зі збільшенням часових послідовностей стокових характеристик, сприяло більш ретельним дослідженням максимального стоку води річок, обґрунтованим розрахункам та прикладним висновкам, створенню гідрологічних стохастичних і детермінованих моделей, вивченню просторового розподілу характеристик максимального стоку з використанням ГІС-технологій тощо, які наведені в дисертаційних дослідженнях та наукових працях В. І. Вишневецького, О. О. Косовця, В. А. Овчарук, В. В. Гребеня, О. І. Лук'янець, Ж. Р. Шакірзанової, Ю. О. Чорноморець, М. В. Гопцій, О. І. Тодорової, О. Г. Ободовського, С. О. Москаленка, Л. О. Горбачової, В. А. Овчарук, О. М. Гончар [3-5, 7-9, 12-15, 18, 24, 28-30]. Аналізуючи публікації вчених-гідрологів останніх років, як серед закордонних, так й українських, перш за все треба відмітити появу масштабних досліджень часових трендів та багаторічних коливань максимального стоку річок, майбутніх тенденцій його змін, обумовлених змінами клімату [2, 16, 17, 19, 25, 31]. Останні наукові публікації і дослідження, що стосуються вивченню стоку води, зокрема, й максимального, р. Дністер та річок його басейну, представлено в роботах [2, 4, 7, 12, 15-17, 19, 24, 25, 31].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття. Стосовно розрахунків граничних інтенсивностей процесів формування максимального стоку річок правобережжя та лівобережжя басейну р. Дністер, то такі оцінки проведені автором статті для досліджуваного регіону вперше. Але запропоновані в представленому дослідженні методичні підходи були апробовані для басейнів річок Тиси та Пруту [27, 33].

Методи та матеріали дослідження. Для певного гідрометричного створу на річці максимальний стік води, зазвичай, виражається найбільшою (максимальною) витратою води. Її величина знаходиться в прямій залежності від площі водозбору річки, тобто, за інших рівних умов, чим більше площа річкового басейну, тим більша буде й витрата води. Витрати води двох різних річок не можна порівнювати між собою, через те що площі їх водозборів неоднакові. Оскільки основним завданням даного дослідження – це розрахунок граничних інтенсивностей процесів формування максимального стоку з водозборів правобережної і лівобережної частин басейну р. Дністер, тому для розрахунків використана характеристика стоку води – модуль стоку в л/(с км²), який показує кількість води в л або м³, що стікає за 1 секунду з 1 км². Цебто, модуль стоку – це витрата води з 1 км². Саме за цією характеристикою можна оцінити інтенсивність формування стоку води в річковому басейні та порівнювати її для різних за розмірами

водозборів. Для цього найбільші спостережені максимальні за рік витрати води на річках $Q_{\max}$ були перераховані в модулі стоку $q_{\max}$ за формулою:

$$q_{\max} = \frac{Q_{\max}}{F} \cdot 10^3, \quad (1)$$

де F – площа водозбору.

Через те, що на досліджуваних річках гідрологічні пости, як вже зазначалося, мають різні за тривалістю періоди спостережень, було визначено, використовуючи наявні ряди річних максимумів, аналітичні значення річних максимумів забезпеченістю 1 % (або повторюваністю 1 раз в 100 років). У нашому випадку, для розрахункових цілей емпіричний розподіл апроксимовано аналітичним біноміальним розподілом Пірсона III типу, який залишається одним з найбільш популярних у світовій практиці гідрологічних розрахунків [6, 11, 33]. Для цього визначено параметри цього розподілу – середнє багаторічне значення (норму) річних максимальних витрат води $\bar{Q}_{\max}$, середнє квадратичне відхилення (стандарт) річних максимальних витрат води $\sigma_{\max}$, коефіцієнт варіації $C_{V\max}$ та коефіцієнт асиметрії $C_{S\max}$ досліджуваних рядів річних максимумів. Встановив нормовані відхилення ϕ ординат розподілу Пірсона III типу в залежності від величини $C_{S\max}$ при даному значенні $C_V=1$, обчислено перехідні модульні коефіцієнти 1% ймовірності перевищення $k_{1\%}$:

$$k_{1\%} = C_{V\max} \cdot \phi + 1. \quad (2)$$

Річні максимальні витрати води 1% ймовірності перевищення розраховано за формулою:

$$Q_{\max 1\%} = k_{1\%} \cdot \bar{Q}_{\max}. \quad (3)$$

А за формулою (1) отримано річні максимальні модулі стоку води 1% ймовірності перевищення $q_{\max 1\%}$.

При цьому вибірці річних максимумів зі всіх досліджуваних гідрометричних постів на річках басейну р. Дністер оцінено на репрезентативність, визначивши відносну середню квадратичну похибку коефіцієнта варіації $\varepsilon_{C_{V\max}}$:

$$\varepsilon_{C_{V\max}} = \pm \sqrt{\frac{1+C_{V\max}}{2 \cdot N}} \cdot 100, \%. \quad (4)$$

де N – тривалість спостережень (кількість років). Якщо $\varepsilon_{C_{V\max}} \leq 10-15\%$, то тривалість ряду достатня для надійних оцінок та розрахунків.

Вихідними даними для виконання дослідження слугували вибірки найбільших річних максимальних витрат води із 44 гідрометричних постів на річках басейну р. Дністер, які створені за матеріалами багаторічних спостережень Державної гідрометеорологічної служби України (табл. 1, 2) [3].

Основні гідрографічні характеристики досліджуваних річок
правобережжя басейну р. Дністер та їх водозборів /
Main hydrographic characteristics of the investigated rivers of the right bank
of the river basin Dniester and their catchment areas

Річка	Гідрологічний пост	Середній похил річки, ‰	Водозбір				
			Площа, км ²	Середня висота, м абс.	Середній похил, ‰	Заболоченість, ‰	Лісистість, ‰
Дністер	с.Стрілки	10,1	384	620	180	0	40
Дністер	м.Самбір	6,5	850	570	171	0	51
Стрв'яж	с.Хирів		355	550			
Стрв'яж	с.Луки	4,0	910	400	85	10	23
Бистриця	с.Озимина	9,1	206	520	152	1	37
Тисьмениця	м.Дрогобич	20,9	250	390	85	5	36
Стрий	с.Матків	15,3	106	860	161	0	56
Стрий	с.Завадівка	6,9	740				
Стрий	с.Ясениця	4,7	2400	760	-	0	48
Стрий	смт Верхнє Синьовидне	3,2	2720	-			
Опір	м.Сколе	12,8	733	820	294	0	50
Славська	смт Славське	38,1	76,3	860	285	0	24
Головчанка	с.Тухля	21,1	130	810	250	0	28
Орава	х.Святослав	15,2	204	860	314	0	68
Свіча	х.Мислівка	23,9	201	1000	322	0	95
Свіча	с.Зарічне	10,2	1280	730	-	<1	64
Лужанка	с.Гошів	26,7	146	660	240	0	55
Сукіль	с.Тисів	26,0	138	770	297	0	80
Лімниця	с.Осмолода	23,7	203	1200	322	0	83
Лімниця	с.Перевозець	10,6	1490	760	-	2	55
Чечва	с.Спас	12,6	269	820	270	0	72
Луква	с.Боднарів	5,4	185	480	46	0	50
Бистриця-Надвірнянська	с.Пасічна	19,5	482	1000	336	0	72
Бистриця Солотвинська	с.Гута	44,6	112	1000	330	0	92

Для даного дослідження взято річки, що протікають в межах правобережної (Карпатської) і лівобережної (Подільської) частин басейну р. Дністер (табл. 1, 2). Такий поділ обумовлений різними умовами формування максимального стоку води річок на зазначених територіях. Як відомо, формування стоку відбувається під впливом фізико-географічних чинників, основними з яких є орографічні (положення щодо переважаючого переносу повітряних мас, крутизна схилів, ґрунтовий і рослинний покрив, товщина водопроникних шарів тощо) та гідрометеорологічні (кількість опадів, їх інтенсивність, тривалість і частота).

Правобережна (Карпатська) частина басейну р. Дністер – це передгірна та гірська область північно-східних схилів Українських Карпат з панівними абсолютними висотами 500-1500 м і найвищими 1600-1800 м. У цій частині досліджуваного

басейну беруть початок основні праві притоки Дністра – це гірські річки зі значними похилами, скалисто-валунним і гальковим ложем та мало проникними підстильними ґрунтами. Гідрографічна річкова мережа цієї частини басейну досить густа і становить 1,0-1,5 км/км². Середні похили річок, що протікають у Карпатській частині басейну р. Дністер змінюються в межах 3-45 ‰, середні висоти їх водозборів – від 400 до 1000-1200 м абс., середні похили водозборів – від 40 до 340 ‰, заболоченість на водозборах – від 0 до 10 ‰, а лісистість – від 20 до 95 % (табл. 1) [3-5, 16, 19, 23].

Лівобережна (Подільська) частина досліджуваного басейну знаходиться у межах Волино-Подільської височини, де переважаючими є абсолютні висоти 200-400 м і протікають ліві притоки р. Дністер. Ця частина басейну являє собою горбку-

Основні гідрографічні характеристики досліджуваних річок
лівого бережжя басейну р. Дністер та їх басейнів /
Main hydrographic characteristics of the investigated rivers of the left bank
of the river basin Dniester and their catchment areas

Річка	Гідрологічний пост	Середній похил річки, ‰	Водозбір				
			Площа, км ²	Середня висота, м абс.	Середній похил, ‰	Заболоченість, ‰	Лісистість, ‰
Золота Липа	с.Задарів	1,4	1390	360	-	1	27
Коропець	м.Підгайці	2,0	227	380	51	2	2
Коропець	смт Коропець	2,4	476	370	49	4	21
Стрипа	х.Каплинці	1,5	411	370	50	2	2
Стрипа	м.Бучач	1,0	1270	360	-	2	2
Серет	смт Велика Березовиця	1,0	939	357	58	5	16
Серет	м.Чортків	0,9	3170	346	-	2	11
Нічлава	с.Стрілківці	2,3	584	295	41	<1	14
Збруч	м.Волочиськ	1,1	712	320	51	3	<1
Жванчик	с.Кугайці	2,3	229	320	53	2	11
Жванчик	с.Ластівці	2,0	703	280	33	<1	10
Смотрич	с.Купин	1,6	799	310	61	6	7
Смотрич	с.Цибулівка	1,3	1790	300	-	4	8
Мукша	с.Мала Слобідка	4,0	302	280	60	1	16
Студениця	с.Голозубинці		246				
Ушиця	с.Тимків	2,0	1150	290	-	<1	19
Калюс	смт Нова Ушиця	4,0	259	280	73	0	15
Лядова	с.Жеребилівка		652				
Мурафа	с.Кудіївці		70,0				
Марківка	с.Підлісівка	6,4	59,7	260	86	0	7

вату поверхню з розвиненою гідрографічною мережею з коефіцієнтом її густоти 0,5-0,7 км/км². Середні похили річок, що протікають у Подільській частині басейну р. Дністер змінюються в межах 1-4 ‰, середні висоти їх водозборів – 260-340 м абс., середні похили водозборів – 40-85 ‰, заболоченість на водозборах – від 0 до 6%, а лісистість – від 2 до 20 ‰ (табл. 2) [2-4, 16, 23].

Кількість опадів в басейні Дністра розподілена досить нерівномірно. В межах правобережної (Карпатської) частині басейну у формуванні клімату велику роль відіграють Карпати. Схили гір впливають на повітряні потоки, гальмуючи їх переніс, створюючи орографічні баричні утворення і, як наслідок, відбувається інтенсифікація випадіння атмосферних опадів. Річні суми атмосферних опадів у Карпатській частині басейну становлять в середньому 800-1000 мм, а в окремі роки – до 1400-1500 мм. На лівобережжі Дністра – Подільської частині басейну випадає у середньому на рік 650-700 мм опадів [7, 12, 16].

Періоди спостережень за максимальним стоком води річок бралися від їх початку до 2019 р. включно. На 59 ‰ гідрологічних постів в дослід-

жуваному басейні мають періоди спостережень тривалістю > 60 років, на 32 ‰ – від 50-60 років, на 9 ‰ постів – < 50 років.

Результати. Для виявлення та узагальнення закономірностей у просторовій мінливості проявів найбільшої інтенсивності процесів формування максимального стоку з водозборів річок правобережжя і лівобережжя басейну р. Дністер на першому етапі дослідження проаналізовано найбільші максимальні витрати води, що фіксувалися в досліджуваних створах річок за період спостережень, які представлено, відповідно, для правобережжя і лівобережжя, у таблицях 3 та 4.

За даними зазначених таблиць проаналізовано тенденції зміни найбільших за період спостережень максимальних модулів стоку води річок в залежності від площі їх водозборів окремо для правобережної (рис. 1, А) та лівобережної частин басейну р. Дністер (рис. 1, Б).

Аналіз побудованих зв'язків (рис. 1, А, Б) показав, що прослідковуються тенденції збільшення максимальних модулів стоку води річок зі зменшенням площі їх водозборів. Але, через різні фізико-географічні та гідрометеорологічні умови

Таблиця 3 / Table 3

Найбільші максимуми стоку води за період гідрометричних спостережень
на річках правобережної частини басейну р. Дністер /
Greatest maxima of water flow during the period of hydrometric observations
on the rivers of the right-bank part of the Dniester River basin

Річка	Гідрологічний пост	Площа водозбору, км ²	Найбільші за період спостережень максимуми стоку		Дата	Рік
			витрата води м ³ /с	модуль стоку, л/с·км ²		
Дністер	с.Стрілки	384	721	1878	25.лип	2008
Дністер	м.Самбір	850	1040	1224	25.лип	2008
Стрв'яз	с.Хирів	353	200	567	28.сер	1966
Стрв'яз	с.Луки	910	328	360	21.кві	1998
Бистриця	с.Озимина	206	453	2199	25.лип	2008
Тисьмениця	м.Дрогобич	250	361	1444	27.сер	1966
Стрий	с.Матків	106	133	1255	05.лис	1998
Стрий	с.Завадівка	740	710	960	23.лип	1980
Стрий	с.Ясениця	1020	678	665	25.лип	2008
Стрий	сміт Верхнє Синьовиднє	2400	2610	1088	09.чер	1969
Опір	м.Сколе	733	1120	1528	25. лип	2008
Славська	сміт Славське	76,3	96,8	1269	28.сер	1968
Головчанка	с.Тухля	130	197	1515	08. лип	2010
Орава	х.Святослав	204	489	2397	08.чер	1969
Свіча	х.Мислівка	201	450	2239	08.чер	1969
Свіча	с.Зарічне	1280	1970	1539	09.чер	1969
Лужанка	с.Гошів	146	478	3274	25.лип	2008
Суکیل	с.Тисів	138	402	2913	25.лип	2008
Лімниця	с.Осмолода	203	178	877	14.лют	1957
Лімниця	с.Перевозець	1490	1710	1148	24.лип	1966
Чечва	с.Спас	269	457	1699	23.лип	2001
Луква	с.Боднарів	185	348	1881	13.лип	1971
Бистриця-Надвірнянська	с.Пасічна	482	577	1197	25.лип	2008
Бистриця Солотвинська	с.Гута	112	400	3571	23.лип	1980

формування стоку річок, максимальні модулі стоку води, якщо порівнювати їх з однакових площ водозборів, для річок правобережної частини басейну р. Дністер, загалом, значно вище щодо лівобережної, де в 3,5-4,5 разів.

На наступному етапі дослідження розраховано аналітичні значення максимального стоку води з приведенням до 100-річного періоду повторення (або 1 % ймовірності перевищення) для всіх створів досліджуваних гідрометричних постів на річках правобережної і лівобережної частин басейну р. Дністер, дотримуючись методичних рекомендацій, представлених у розділі статті «Методи та матеріали дослідження». В таблицях 5 та 6 подано основні статистичні параметри функцій розподілу максимального стоку води відповідно для правобережної і лівобережної частин басейну р. Дністер – середні багаторічні значення річних максимальних витрат води $\bar{Q}_{\text{макс}}$, коефіцієнти

варіації $C_{V\text{макс}}$ та коефіцієнти асиметрії $C_{S\text{макс}}$, а також відносні середні квадратичні похибки коефіцієнта варіації $\varepsilon_{C_{V\text{макс}}}$ та нормовані відхилення ϕ ординат розподілу.

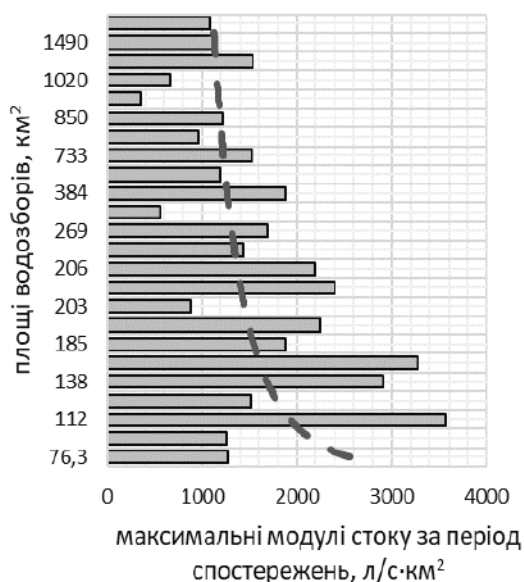
Багаторічна мінливість річних максимумів стоку води річок правобережної частини р. Дністер менша (осереднене значення $C_{V\text{макс}} = 0,76$) у порівнянні з лівобережжям (осереднене значення $C_{V\text{макс}} = 1,13$). Характерним для обох частин досліджуваного басейну є переважання незначних за висотою максимумів, про це свідчать розраховані коефіцієнти асиметрії $C_{S\text{макс}}$ (для правобережжя р. Дністер осереднене значення, $C_{S\text{макс}} = 1,80$, для лівобережжя – $C_{S\text{макс}} = 2,78$).

За розрахованими показниками середньої квадратичної похибки $\varepsilon_{C_{V\text{макс}}}$ досліджувані вибірки річних максимумів стоку води на річках басейну р. Дністер можна вважати репрезентативними (табл. 5 та 6).

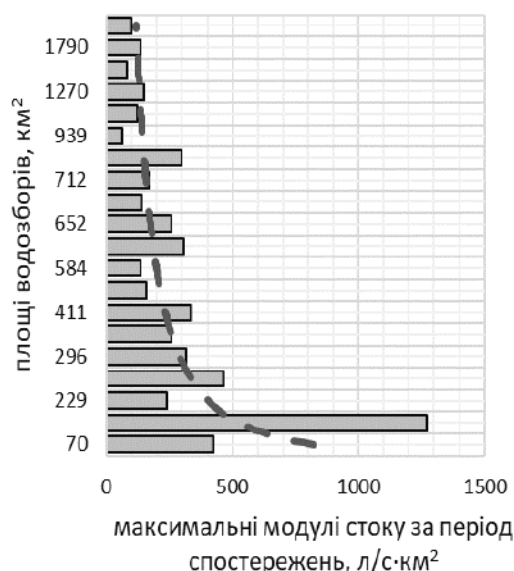
Таблиця 4 / Table 4

Найбільші максимуми стоку води за період гідрометричних спостережень
на річках правобережної частини басейну р. Дністер /
Greatest maxima of water flow during the period of hydrometric observations
on the rivers of the left-bank part of the Dniester River basin

Річка	Гідрологічний пост	Площа водозбору, км ²	Найбільші за період спостережень максимуми стоку		Дата	Рік
			витрата води м ³ /с	модуль стоку, л/с·км ²		
Золота Липа	с.Задарів	1390	115	82,7	13.чер	1957
Коропець	м.Підгайці	227	289	1273	13.чер	1957
Коропець	смт Коропець	476	75,5	159	02.лип	1953
Стрипа	х.Каплинці	411	137	333	03.кві	1969
Стрипа	м.Бучач	1270	192	151	04.кві	1969
Серет	смт Велика Березовиця	939	61,1	65,1	21.бер	1979
Серет	м.Чортків	3070	303	98,7	05.кві	1956
Нічлава	с.Стрілківці	584	78,5	134	13.лип	1955
Збруч	м.Волочиськ	712	118	166	22.бер	1979
Жванчик	с.Кугаївці	229	55	240	03.кві	1956
Жванчик	с.Ластівці	703	100	142	04.кві	1956
Смотрич	с.Купин	799	238	298	04.кві	1956
Смотрич	с.Цибулівка	1790	243	136	03.кві	1969
Мукша	с.Мала Слобідка	302	78	258	18.чкр	1962
Студениця	с.Голозубинці	296	93,6	316	17.бер	1979
Ушиця	с.Тимків	1150	141	123	16.бер	1973
Калюс	смт Нова Ушиця	259	121	467	22.чер	1975
Лядова	с.Жеребилівка	652	168	258	28.чер	1980
Мурафа	с.Кудіївці	70	29,7	424	17.бер	1979
Марківка	с.Підлісівка	615	190	309	06.бер	1970



А)



Б)

Рис. 1. Тенденції зміни найбільших за період спостережень максимальних модулів стоку води річок в залежності від площі їх водозборів для А) – правобережної (Карпатської) частини та Б) – лівобережної (Подільської) частини басейну р. Дністер /

Fig. 1. Trends in changes in the largest maximum specific runoff of rivers during the observation period, depending on the area of their catchments for А) - the right-bank (Carpathian) part and Б) - the left-bank (Podilskyi) part of the river basin. Dniester

Таблиця 5 / Table 5

Основні статистичні параметри розподілу максимального стоку з водозборів
річок правобережної частини басейну р. Дністер /
Main statistical parameters of the distribution of maximum runoff from the river catchments
of the right-bank part of the Dniester River basin

Річка	Гідрологічний пост	N	$\bar{Q}_{\text{макс}}$	$C_{V\text{макс}}$	$\varepsilon_{C_{V\text{макс}}}$	$C_{S\text{макс}}$	$\phi_{1\%}$
Дністер	с.Стрілки	58	122,2	0,979	13,0	3,307	4,15
Дністер	м.Самбір	70	246,8	0,872	11,2	1,701	3,45
Стрв'язь	с.Хирів	45	69,6	0,646	12,5	0,984	3,01
Стрв'язь	с.Луки	59	92,4	0,730	11,4	1,526	3,32
Бистриця	с.Озимица	60	112,6	0,996	12,9	1,388	3,27
Тисьмениця	м.Дрогобич	75	100,6	0,902	11,0	1,528	3,32
Стрий	с.Матків	61	47,7	0,505	10,1	1,467	3,29
Стрий	с.Завадівка	54	311,7	0,440	10,5	0,939	3,00
Стрий	с.Ясениця	33	335,3	0,400	13,3	0,918	2,95
Стрий	сміт Верхнє Синьовидне	65	738,6	0,594	10,2	1,89	3,54
Опір	м.Сколе	59	312,8	0,688	11,2	1,888	3,54
Славська	сміт Славське	62	29,5	0,607	10,5	1,769	3,49
Головчанка	с.Тухля	61	55,1	0,657	10,8	1,708	3,45
Орава	х.Святослав	71	75,8	0,980	11,7	3,366	4,17
Свіча	х.Мислівка	60	95,7	0,885	12,2	2,323	3,73
Свіча	с.Зарічне	63	451,7	0,951	12,3	2,4	3,78
Лужанка	с.Гошів	66	87,7	1,103	13,0	2,002	3,60
Сукіль	с.Тисів	57	89,9	0,964	13,0	1,935	3,57
Лімниця	с.Осмолода	59	72,6	0,486	10,2	1,176	3,13
Лімниця	с.Перевозець	62	439,3	0,798	11,5	1,779	3,49
Чечва	с.Спас	60	140,6	0,752	11,4	1,506	3,33
Луква	с.Боднарів	62	89,2	0,840	11,7	1,703	3,46
Бистриця-Надвірнянська	с.Пасічна	59	189,9	0,619	10,8	1,264	3,21
Бистриця Солотвинська	с.Гута	67	80,8	0,934	11,8	2,549	3,83

В таблицях 7 та 8 проведено обчислення максимальних витрат води 1 % забезпеченості $Q_{\text{макс}1\%}$ (за формулами 2, 3) і розрахунки максимальних модулів стоку води 1 % забезпеченості $q_{\text{макс}1\%}$ (л/с·км²) для правобережної і лівобережної частин басейну р. Дністер (за формулою 1). Використовуючи вихідні дані з таблиць 1, 2, 7, 8, знайдено кореляційні залежності між розрахованими максимальними модулями стоку води річок 1% забезпеченості $q_{\text{макс}1\%}$ і площами їх водозборів F для правобережної (Карпатської) частини та лівобережної (Подільської) частини басейну р. Дністер (рис. 2).

За побудованими зв'язками $q_{\text{макс}1\%} = f(F)$ чітко прослідковується те, що крайніми проявами найбільшої інтенсивності процесів формування максимального стоку на річках відзначаються малі й елементарні водозбори (рис. 2). Й такі інтенсивності будуть тим більше виражені, чим менше масштаб розгляду.

Для правобережжя рівень апроксимації зв'язку між розрахованими максимальними модулями стоку води річок 1% забезпеченості та площами їх водозборів (рис. 2, А) становить $R^2 = 0,363$, відповідно кількісна міра тісноти через кореляційні відношення $r = 0,60$, що якісно цей зв'язок можна охарактеризувати як помітний. Для лівобережжя р. Дністра (рис. 2, Б) зазначені показники вище – $R^2 = 0,516$, $r = 0,72$, що характеризує зв'язок, як високий.

Використовуючи отримані рівняння зв'язку між розрахованими максимальними модулями стоку води річок 1% забезпеченості від площі їх водозборів (рис. 2, А і Б)

для правобережної (Карпатської) частини басейну р. Дністер

$$q_{\text{макс}1\%PB} = 9926,8 \cdot F^{-0,346}$$

та лівобережної (Подільської) частини басейну р. Дністер

$$q_{\text{макс}1\%LB} = 4568 \cdot F^{-0,493},$$

проведено розрахунки ймовірних максимальних модулів стоку води 1% забезпеченості з невеликих водозбірних площ – 2, 5, 10, 20, 50 та 100 км² (табл. 9).

За представленими розрахунками максимальні модулі стоку води річок з малих елементарних водозборів площею від 2 до 10 км² можуть досягати для правобережної (Карпатської) частини басейну р. Дністер 4500-7500 л/с·км², а для лівобережної (Подільської) частини 1500-3200 л/с·км².

Треба зазначити, що розраховані максимальні модулі стоку води 1% забезпеченості, що приведені до водозбірних площ 2, 5, 10, 20, 50 та 100 км² для річок правобережної (Карпатської) частини та лівобережної (Подільської) частини басейну р. Дністер (табл. 9) не можна вважати однозначними, тобто, що саме з цієї водозбірної площі інтенсивність процесів формування максимумів на річках буде такою і тільки такою. Звісно, очевидна значна просторово-часова мінливість поля максимальних модулів стоку в межах досліджуваних територій. Так, через складний рельєф в гірській Карпатській частині басейну р. Дністер інтенсивність формування максимумів стоку води річок тут досить мозаїчна. Причин багато, які впливають комплексно та опосередковано – це й різноманітні похили навітряних та підвітряних

гірських схилів, нерівномірності не тільки кількості та й інтенсивності атмосферних опадів тощо.

Обговорення та висновки. В представленому дослідженні проведена оцінка можливих граничних інтенсивностей процесів формування максимального стоку з водозборів річок правобережної (Карпатської) та лівобережної (Подільської) частин басейну р. Дністер за даними багаторічних спостережень мережі гідрометричних постів Державної гідрометеорологічної служби України. Вихідними даними слугували найбільші річні максимальні витрат води із 44 гідрометричних постів від початку спостережень до 2019 р. включно. Оскільки періоди спостережень різні (59 % постів має спостереження >60 років, 32 % - 50-60 років і н 9% < 50 років), визначено аналітичні значення максимумів 1% забезпеченості (повторюваністю 1 раз в 100 років). Для розрахункових цілей емпіричний розподіл апроксимовано аналітичним розподілом Пирсона III типу. Побудовані зв'язки між максимальними модулями стоку води (л/с·км²) в окремих створах річок 1 % забезпеченості від відповідних площ (км²) їх басейнів чітко показали, що яскравими проявами граничної інтенсивності формування максимального стоку на річках відзначаються малі й елементарні водозбори. Міра тісноти зв'язків (через кореляційні відношення) для правобережжя та лівобережжя

Таблиця 6 / Table 6

Основні статистичні параметри розподілу максимального стоку з водозборів
річок лівобережної частини басейну р. Дністер /
Main statistical parameters of the distribution of maximum runoff from the river catchments
of the left-bank part of the Dniester River basin

Річка	Гідрологічний пост	N	$\bar{Q}_{\text{макс}}$	$C_{V\text{макс}}$	$\varepsilon_{C_{V\text{макс}}}$	$C_{S\text{макс}}$	$\Phi_{1\%}$
Золота Липа	с.Задарів	61	31,1	0,588	10,5	2,478	3,81
Коропець	м.Підгайці	69	14,0	2,467	22,7	7,675	4,71
Коропець	смт Коропець	58	27,4	1,084	13,7	4,414	4,42
Стрипа	х.Каплинці	71	25,1	1,161	12,9	2,347	3,74
Стрипа	м.Бучач	52	40,3	0,942	13,5	2,048	3,61
Серет	смт Велика Березовиця	54	24,0	0,835	12,5	4,343	4,4
Серет	м.Чортків	90	72,1	0,864	9,9	1,724	3,47
Нічлава	с.Стрілківці	62	15,6	1,018	12,8	1,637	3,42
Збруч	м.Волочиськ	59	24,1	1,004	13,0	2,262	3,71
Жванчик	с.Кугаївці	74	7,9	1,119	12,3	2,807	3,96
Жванчик	с.Ластівці	59	17,6	1,036	13,3	2,631	3,88
Смотрич	с.Купин	76	42,9	1,064	11,8	2,031	3,61
Смотрич	с.Цибулівка	82	60,4	1,146	11,9	3,265	4,12
Мукша	с.Мала Слобідка	62	9,5	1,34	15,0	3,693	4,27
Студениця	с.Голозубинці	45	12,8	1,282	17,1	3,241	4,11
Ушиця	с.Тимків	44	39,5	0,742	13,3	1,489	3,34
Калюс	смт Нова Ушиця	65	25,3	1,27	14,2	1,403	3,27
Лядова	с.Жеребилівка	52	22,5	1,318	16,2	3,232	4,11
Мурафа	с.Кудіївці	51	5,3	1,215	15,6	1,596	3,39
Марківка	с.Підлісівка	63	18,8	1,201	13,9	1,309	3,21

Таблиця 7 / Table 7

Розрахункові значення максимального стоку води 1 % ймовірності перевищення
з водозборів річок правобережної частин басейну р. Дністер /
Estimated values of maximum water flow with a 1% probability of exceedance
from the river catchments of the right-bank parts of the Dniester River basin

Річка	Гідрологічний пост	$\bar{Q}_{\text{макс}}$	$k_{1\%}$	$Q_{\text{макс}1\%}$	$M_{\text{макс}1\%}$
Дністер	с.Стрілки	122,2	5,06	618,6	1611
Дністер	м.Самбір	246,8	4,01	989,1	1164
Стрв'яж	с.Хирів	69,6	2,94	205,1	581
Стрв'яж	с.Луки	92,4	3,42	316,2	347
Бистриця	с.Озимина	112,6	4,26	479,3	2327
Тисьмениця	м.Дрогобич	100,6	3,99	401,7	1607
Стрий	с.Матків	47,7	2,66	127,0	1198
Стрий	с.Завадівка	311,7	2,32	723,2	977
Стрий	с.Ясениця	335,3	2,18	730,9	717
Стрий	смт Верхнє Синьовидне	738,6	3,10	2291,8	955
Опір	м.Сколе	312,8	3,44	1074,6	1466
Славська	смт Славське	29,5	3,12	91,9	1205
Головчанка	с.Тухля	55,1	3,27	180,1	1385
Орава	х.Святослав	75,8	5,09	385,8	1891
Свіча	х.Мислівка	95,7	4,30	411,8	2049
Свіча	с.Зарічне	451,7	4,59	2075,4	1621
Лужанка	с.Гошів	87,7	4,97	436,0	2987
Сукіль	с.Тисів	89,9	4,44	399,2	2893
Лімниця	с.Осмолода	72,6	2,52	182,9	901
Лімниця	с.Перевозець	439,3	3,79	1662,6	1116
Чечва	с.Спас	140,6	3,50	492,6	1831
Луква	с.Боднарів	89,2	3,91	348,4	1883
Бистриця-Надвірнянська	с.Пасічна	189,9	2,99	567,1	1177
Бистриця Солотвинська	с.Гута	80,8	4,58	369,7	3301

Таблиця 8 / Table 8

Розрахункові значення максимального стоку води 1 % ймовірності перевищення з водозборів річок
правобережної і лівобережної частин басейну р. Дністер / Estimated values of maximum water flow
with a 1% probability of exceedance from the river catchments of the left-bank parts of the Dniester River basin

Річка	Гідрологічний пост	$\bar{Q}_{\text{макс}}$	$k_{1\%}$	$Q_{\text{макс}1\%}$	$M_{\text{макс}1\%}$
Золота Липа	с.Задарів	31,1	3,24	100,9	73
Коропець	м.Підгайці	14,0	12,62	176,5	777
Коропець	смт Коропець	27,4	5,79	158,5	333
Стрипа	х.Каплинці	25,1	5,34	133,9	326
Стрипа	м.Бучач	40,3	4,40	177,3	140
Серет	смт Велика Березовиця	24,0	4,67	112,0	119
Серет	м.Чортків	72,1	4,00	288,2	94
Нічлава	с.Стрілківці	15,6	4,48	70,0	120
Збруч	м.Волочиськ	24,1	4,72	113,8	160
Жванчик	с.Кугаївці	7,9	5,43	42,9	187
Жванчик	с.Ластівці	17,6	5,02	88,4	126
Смотрич	с.Купин	42,9	4,84	207,6	260
Смотрич	с.Цибулівка	60,4	5,72	345,4	193
Мукша	с.Мала Слобідка	9,5	6,72	64,0	212
Студениця	с.Голозубинці	12,8	6,27	80,5	272
Ушиця	с.Тимків	39,5	3,48	137,5	120
Калюс	смт Нова Ушиця	25,3	5,15	130,3	503
Лядова	с.Жеребилівка	22,5	6,42	144,4	221
Мурафа	с.Кудіївці	5,3	5,12	27,3	390
Марківка	с.Підлісівка	18,8	4,86	91,5	149

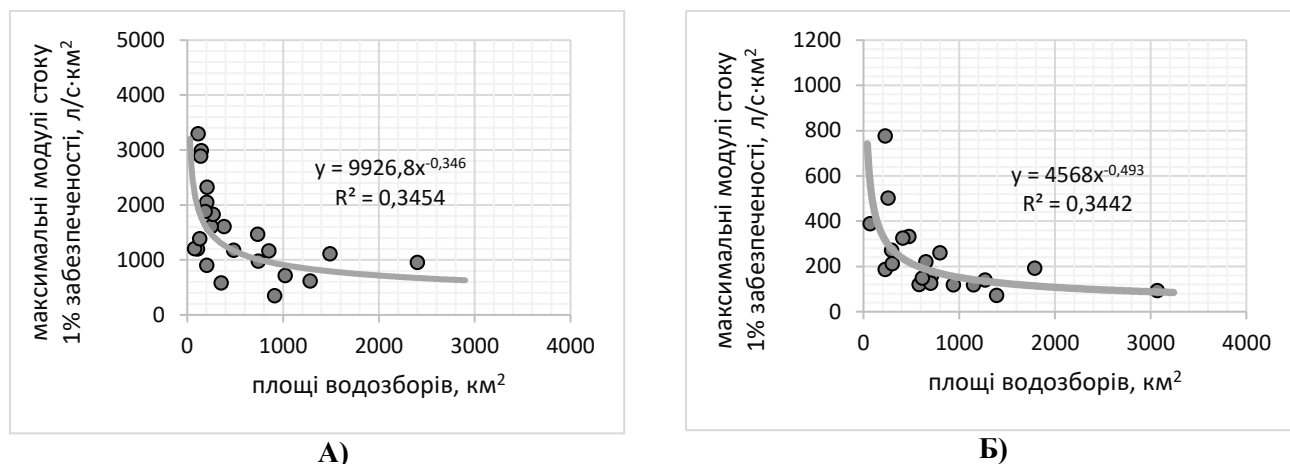


Рис. 2. Залежності між розрахованими максимальними модулями стоку води річок 1% забезпеченості від площі їх водозборів для А) – правобережної (Карпатської) частини та Б) – лівобережної (Подільської) частини басейну р. Дністер /
Fig. 2. Dependencies between the calculated maximum specific runoff of river with a 1% probability of exceedance and the areas of their catchments for А) – right-bank (Carpathian) part and Б) – left-bank (Podilsky) part of the Dniester River basin

Таблиця 9 / Table 9

Розрахунок максимальних модулів стоку води, приведених до водозбірних площ 2, 5, 10, 20, 50 та 100 км² для річок правобережної (Карпатської) частини та лівобережної (Подільської) частини басейну р. Дністер /
Calculation of maximum specific runoff, reduced to catchment areas of 2, 5, 10, 20, 50 and 100 km² for rivers of the right-bank (Carpathian) part and the left-bank (Podilsky) part of the Dniester River basin

Розраховані максимальні модулі стоку води (л/с·км ²) 1% забезпеченості, що проведені до площ водозборів					
2 км ²	5 км ²	10 км ²	20 км ²	50 км ²	100 км ²
Правобережна (Карпатська) частина басейну р. Дністер					
7810	5688	4475	3521	2564	2017
Лівобережна (Подільська) частина басейну р. Дністер					
3245	2066	1468	1043	663	472

р. Дністер дозволило якісно охарактеризувати отримані залежності, відповідно, як помітні і високі. За проведеними розрахунками максимальні модулі стоку води з елементарних водозборів правобережної (Карпатської) частини басейну р. Дністер площею 2-10 км² можуть досягати 7500-4500 л/с·км², а площею 10-20 км² – 4500-3500 л/с·км². Для лівобережної (Подільської) частини басейну р. Дністер інтенсивності процесів формування максимального стоку води менші - з елементарних водозборів площею 2-10 км² максимальні

модулі стоку води можуть досягати 3200-1500 л/с·км², площею 10-20 км² – 1500-1000 л/с·км². Вищезазначені величини відображають максимальні можливості природи з формування стоку води річок в досліджуваному регіоні. Однак, враховуючи притаманну мінливість гідрологічних процесів, ці оцінки не є абсолютними і повинні розглядатися як показники потенційної граничної інтенсивності формування стоку води річок, а не точні порогові значення для всіх локацій певного масштабу.

Список використаних джерел

1. Бойко, В. М., Кульбіда, М. І., Сусідко, М. М. (1999). Визначний дощовий паводок на річках Закарпаття в листопаді 1998 р. Наукові праці УкрНДГМІ. 247. 91-101.
2. Більбот, Г. В., Капуста, Т. Я. (2024). Аналіз внутрішньорічного розподілу стоку води лівобережних приток Дністра в межах Тернопільської області. Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія., 1(71), 40-49. DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2024.1.4>
3. Вишневецький, В. І., Косовець, О. О. (2003). Гідрологічні характеристики річок України. Київ: Ніка-центр. 324.
4. Гончар, О. М. (2011). Загальний аналіз гідрологічного режиму річок у басейні Дністра. Науковий вісник Чернівецького університету: збірник наукових праць. Чернівці: Чернівецький нац. ун-т.: Географія, 553-554. 83-87. DOI: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvchnu_2011_553-554_19

5. Гонцій, М. В., Гонченко, Є. Д. (2011). Дощові паводки в Українських Карпатах та їх розрахункові характеристики. *Гідрологія, гідрохімія, гідроекологія*, 2(23). 57-62. DOI: http://nbuv.gov.ua/UJRN/glghge_2011_2_8
6. Гонченко, Є. Д. (1994). Максимальний стік із річкових водозборів (теоретичне обґрунтування, методика побудови та практична реалізація розрахункових моделей) : дис. на здобуття наукового ступеня док. геогр. наук: спец. 11.00.07 – «Гідрологія суші, водні ресурси, гідрохімія». Київ. 356.
7. Гребінь, В. В. (2010). Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз). К. : Ніка-Центр. 316. DOI: https://geo.knu.ua/wp-content/uploads/2021/03/10_n_lit_gidrol.pdf.pdf
8. Гребінь, В. В., Лук'янець, О. І. (2022). Оцінки стокоформуючих опадів при формуванні високих паводків 1998 та 2001 років на річках басейну Тиси (в межах України). *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, 1(63). 20-30. DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2022.1.2>
9. Гребінь, В. В., Лук'янець, О. І., Андрела, С. П. (2013). Характер змін режиму водності та повторюваності паводків в холодний і теплий періоди року в басейні Тиси (у межах України). *Український гідрометеорологічний журнал*. Одеса: Вид-во ПП «ТЕС», 13. 147-154. DOI: <http://uhmj.odetu.edu.ua/harakter-zmin-rezhymu-vodnosti-ta-povtoryuvanosti-pavodkiv-v-holodnyi-i-teplyj-periody-roku-v-basejni-r-tyssa-u-mezhah-ukrayiny/>
10. Дячук, В. А., Сусідко, М. М. (1999). Паводки в Закарпатті та причини їх виникнення. *Укр. географ. журн.*, 1. 48-51.
11. Кирилюк, М. І. (2001). Режим формування історичних паводків в Українських Карпатах. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, 2. 163-167.
12. Кожем'якін, Д. В., Чорноморець, Ю. О. (2018). Водний баланс басейнів річок Дністра до міста Заліщики. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, 1(41). 24-36. DOI: http://nbuv.gov.ua/UJRN/glghge_2018_1_5
13. Лук'янець, О. І., Камінська, Т. П. (2015). Закономірності та просторова синхронність багаторічних циклічних коливань водного стоку річок Українських Карпат. *Науковий вісник Чернівецького університету: збірник наукових праць*. Чернівці: Чернівецький нац. ун-т.: Географія, 744-745. 18-24. DOI: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvchnu_2015_744-745_6
14. Лук'янець, О. І., Москаленко, С. О. (2019). Співвідношення між середньодобовими та строковими максимумами на річках басейну Тиси в межах України. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, 3 (54). 57-58.
15. Лук'янець, О. І., Москаленко, С. О. (2019). Узагальнення та багаторічна мінливість максимального річного стоку води річок відповідно до гідрографічного районування України. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, 2 (53). 6-20. DOI: http://nbuv.gov.ua/UJRN/glghge_2019_2_3
16. Мудра, К. В. (2019). Основні характеристики водного режиму річок басейну Дністра в умовах змін клімату: автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 11.00.07. Київ. нац. ун-т ім. Тараса Шевченка. Київ. 21.
17. Мудра, К. В. (2018). Аналіз багаторічної динаміки коливань стоку Дністра та його приток. *Фізична географія та геоморфологія*, 3 (91). 15-20.
18. Овчарук, В. А., Тодорова, О. І., Прокоф'єв, О. М. (2017). Максимальний стік дощових паводків річок гірського Криму в умовах активного впливу підстильної поверхні. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, 4 (47). 29-35. DOI: http://nbuv.gov.ua/UJRN/glghge_2017_4_4
19. Проект ініціативи ENVSEC «Зниження вразливості до екстремальних повеней та зміни клімату в басейні річки Дністер». С. Краковська, В. Балабух, Л. Горбачова, Ю. Набіванець (2012). Київ : УкрГМІ. 118.
20. Сусідко, М. М. (1973). Залежність характеристик максимальних витрат води дощових паводків у басейні Дністра від ландшафтних умов. *Праці УкрНДГМІ*, 123. 100-118.
21. Сусідко, М. М. (1974). Дослідження циклічних коливань дощового стоку у басейні Дністра. *Тр. УкрНДГМІ*, 127. 16-37.
22. Сусідко, М. М., Лук'янець, О. І. (1999). Паводки в Карпатах – причини їх виникнення та повторюваність // *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції "Стихійні явища у Карпатах"*. Рахів. 316-321.
23. Сусідко, М. М., Полякова, С. О., Щербак, А. В. (2006). Каталог характеристик дощових і сніго-дощових паводків на річках Карпатського регіону за 1989–2002 роки. *Наук. праці УкрНДГМІ*, 255. 299-310. DOI: https://old.uhmi.org.ua/pub/np/255/12_Susid_Pol_Sherbak.pdf
24. Gorbachova, L., Nabyvanets, Yu. (2012). Forecasted estimations of runoff change in the Dniester Basin under conditions of climate change. *EGU Leonardo 2012, Hydrology and Society*, November 14th – 16th. Torino, Italy. 87.
25. Grebin, Vasyl, Mudra, Kateryna (2018). Forecasting the Runoff on Rivers of the Dniester River Basin According to the Remo Numeric Climatic Model. *World Science. Multidisciplinary Scientific Edition*. 9 (37). 26-32.
26. Luk'yanets, O., Sossedko, M. (1998). Die Abflussbewertung auf nächste Jahre in den Karpaten unter Berücksichtigung der mehrjährigen Abflussschwankungen. *Sammelband der XIX. Konferenz der Donauländer. Osijek (Kroatien)*. 393-401.
27. Moskalenko, S., Malyska, L. (2021). Peak maxima on the rivers of the Prut and Siret basins (within Ukraine). *Acta Hydrologica Slovaca*, 22, 2. 177–186. DOI: https://doi.org/10.31577/ahs-2021_0022.02.0021
28. Oleksandr, Obodovskyi, Olga, Lukianets (2017). Patterns and Forecast of Long-term Cyclical Fluctuations of the Water Runoff of Ukrainian Carpathians Rivers. *Scientific Journal of Environmental Research, Engineering and Management*, 73, 1. Kaunas University of Technology. 33-47. DOI: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.erem.73.1.15799>
29. Olga, Lukianets and Iurii, Obodovskyi (2015). Spatial, Temporal and Forecast Evaluation of Rivers' Streamflow of the Drainage Basin of the Upper Tisa under the Conditions of Climate Change. *Scientific Journal: ENVIRONMENTAL Research, Engineering and Management*, 71(1). Kaunas, KTU. 36-46. DOI: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.erem.71.1.10286>

30. Olga, Lukianets (2017). *Stochastic regularities of long-term fluctuation of average annual runoff of rivers of Tisza river basin (within the Ukraine). Electronic Book with full papers from XXVII Conference of Danubian Countries on the hydrological forecasting and hydrological bases of water management.* 26-28 September 2017, Golden Sands, Bulgaria. 280-290.
31. OSCE/UNECE Project: *Transboundary Co-operation and Sustainable Management of the Dniester River TRANS-BOUNDARY DIAGNOSTIC STUDY FOR THE DNIESTER RIVER BASIN.* 2005. DOI: <https://www.osce.org/ukraine/104057?download=true>
32. Shendrik, S. P. Sosedko, M. M. Lukianets, O. I. (1996). *Ein Versuch zur genaueren Bestimmung der Wahrscheinlichkeit maximaler Regenhochwasserabflüsse / XVIII. Konferenz d. Donauländer. Graz, August Band 19/1 TU.*
33. Stanislav, Moskalenko, Liudmyla, Malytska (2024). *Estimation of the limiting intensities of processes forming maximum water runoff in the Tisza and Prut river basins within Ukraine. Hydrological Processes, Ecosystems and Climate Change. E-Book, IH SAS, Bratislava, 121-129. ISBN: 978-80-89139-61-3. DOI: https://1778df732d.clvaw-cdnwnd.com/464163c6c58a7760d10c2dc0e217449b/200000721-6edad6edb0/E-Book%20of%20Pa-pers%20UH%20SAV_2024_11.11..pdf?ph=1778df732d*

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

Stanislav Moskalenko

PhD (Geography), Assistant, Department of Hydrology and Hydroecology,
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

ABSTRACT

Introduction. The maximum flow of rivers, on the one hand, refers to extreme indicators of their water regime, which is the highest degree of danger and catastrophic situations, and on the other hand, it is a natural phenomenon that reflects the maximum potential of nature for its formation within the river basin or a certain territory. The purpose of the study is to generalize the patterns of spatial variability of the manifestations of the greatest intensity of the processes of formation of maximum runoff separately for the right-bank (Carpathians) and left-bank (Podillia) parts of the Dniester River basin, and to calculate the limiting intensities with reduction to certain catchment areas.

Methods. The methods of mathematical statistics and the theory of probabilities were used in the research - correlations between random variables, Pearson's analytical distribution of type III. Initial data - series of the largest annual maximum water discharges from 44 hydrometric stations of the State Hydrometeorological Service of Ukraine on the rivers of the Dniester River basin, from the beginning of their observations to 2019 inclusive. 59% of hydrological stations have observation periods > 60 years, 32% - from 50-60 years, 9% of stations - < 50 years.

Results. Analysis of the observed maximum water flows for the right-bank and left-bank parts of the Dniester River basin showed trends in their change - an increase in the maximum specific runoff ($l \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$) of river water is observed with a decrease in the area of their catchments. However, due to different physical, geographical and hydrometeorological conditions, the maximum specific runoff of water flow from the same catchment areas for the rivers of the right-bank of the Dniester River basin are significantly higher than for the left-bank part, by about 3,5-4,5 times.

Since the observation periods are different, analytical values of the maxima reduced to 1% exceedance probability were determined, approximated by a Pearson type III distribution. The constructed relationships between the maximum specific runoff of water ($l \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$) in individual sections of rivers with 1% exceedance probability from the corresponding areas (km^2) of their basins clearly showed that small and elementary catchments are marked by bright manifestations of the limiting intensity of the formation of maximum runoff on rivers. The measure of the tightness of the relationships for the right-bank and left-bank parts of the Dniester River allowed us to qualitatively characterize the obtained dependencies, respectively, as noticeable and high. This made it possible, using the obtained coupling equations, to calculate the probable maximum modules of water runoff of 1% exceedance probability from small catchment areas – 2, 5, 10, 20, 50 and 100 km^2 .

Conclusions. The maximum specific runoff of water from elementary catchments of the right-bank (Carpathian) of the Dniester River basin with an area of 2-10 km^2 can reach 7500-4500 $l \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$, and with an area of 10-20 km^2 – 4500-3500 $l \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$. For the left-bank (Podillia) the intensity of the processes of formation of maximum water runoff is lower - from elementary catchments with an area of 2-10 km^2 – 3200-1500 $l \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$, with an area of 10-20 km^2 – 1500-1000 $l \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$. However, given the variability of hydrological processes these estimates are not absolute and should be considered indicative of potential intensities rather than precise thresholds for all locations.

Keywords: Dniester River, rivers of the right-bank and left-bank parts of the basin, maximum water flow, maximum intensity of runoff formation.

References

1. Boyko, V. M., Kulbida, M. I., Susidko, M. M. (1999). *Significant rain flood on the rivers of Transcarpathia in November 1998. Scientific works of UkrNDGMI, 247, 91-101 [in Ukrainian].*

2. Bolbot, G. V., Kapusta, T. Ya. (2024). Analysis of the intraannual distribution of water runoff of the left-bank tributaries of the Dniester within the Ternopil region. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*. 1(71), 40-49. DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2024.1.4> [in Ukrainian].
3. Vyshnevskiy, V. I., Kosovets O. O. (2003) Hydrological characteristics of the rivers of Ukraine. Kyiv: Nika-center, 324 [in Ukrainian].
4. Honchar, O. M. (2011). General analysis of the hydrological regime of rivers in the Dniester basin. *Scientific Bulletin of Chernivtsi University: Collection of Scientific Papers*. Chernivtsi: Chernivtsi National University: Geography. 553-554, 83-87. DOI: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvchnu_2011_553-554_19 [in Ukrainian].
5. Hoptsi, M. V., Hopchenko, E. D. (2011). Rain floods in the Ukrainian Carpathians and their calculated characteristics. *Hydrology, Hydrochemistry, Hydroecology*. 2(23), 57-62. DOI: http://nbuv.gov.ua/UJRN/glghge_2011_2_8 [in Ukrainian].
6. Gopchenko, E. D. (1994). Maximum runoff from river catchments (theoretical justification, construction methodology and practical implementation of calculation models): dis. at the scientific level doc. geogr. Sciences: spec. 11.00.07 – Hydrology of land, water resources, hydrochemistry. Kyiv, 356. [in Ukrainian]
7. Hrebin, V. V. (2010). Modern water regime of the rivers of Ukraine (landscape hydrological analysis). Kyiv: Nika-Center, 316. DOI: https://geo.knu.ua/wp-content/uploads/2021/03/10_n_lit_gidrol.pdf.pdf [in Ukrainian].
8. Hrebin, V. V., Lukianets, O. I. (2022). Estimates of runoff-forming precipitation during the formation of high floods in 1998 and 2001 on the rivers of the Tysa basin (within Ukraine). *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*. 1(63), 20-30. DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2022.1.2> [in Ukrainian].
9. Hrebin, V. V., Lukianets, O. I., Andrela, S. P. (2013). The nature of changes in the water regime and the recurrence of floods in the cold and warm periods of the year in the Tisza basin (within Ukraine). *Ukrainian Hydrometeorological Journal: Scientific Journal*. Odesa: Publishing House PP "TES". 13, 147-154. DOI: <http://uhmj.odku.edu.ua/harakter-zmin-rezhymu-vodnosti-ta-povtoryuvanosti-pavodkiv-v-holodnyj-i-teplyj-periody-roku-v-basejni-r-tysa-u-mezhah-ukrayiny/> [in Ukrainian]
10. Dyachuk, V. A., Susidko, M. M. (1999). Floods in Transcarpathia and the causes of their occurrence. *Ukr. geogr. zhurn.*, 1, 48-51 [in Ukrainian].
11. Kyrylyuk, M. I. (2001). The formation regime of historical floods in the Ukrainian Carpathians. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*. 2, 163-167 [in Ukrainian]
12. Kozhem'yakin, D. V., Chornomorets, Yu. O. (2018). Water balance of the Dniester river basins to the city of Zalizhchyky. *Hydrology, hydrochemistry and hydroecology*. 1(41). 24-36. DOI: http://nbuv.gov.ua/UJRN/glghge_2018_1_5 [in Ukrainian].
13. Lukianets, O. I., Kaminska, T. P. (2015). Regularities and spatial synchrony of long-term cyclic fluctuations of water flow of rivers of the Ukrainian Carpathians. *Scientific Bulletin of Chernivtsi University: Collection of scientific papers*. Chernivtsi: Chernivtsi National University: Geography. 744-745, 18-24. DOI: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvchnu_2015_744-745_6 [in Ukrainian]
14. Lukianets, O. I., Moskalenko, S. O. (2019). The relationship between average daily and term maxima on the rivers of the Tisza basin within Ukraine. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*. 3 (54). 57-58 [in Ukrainian]
15. Lukianets, O. I., Moskalenko, S. O. (2019). Generalization and multi-year variability of the maximum annual water flow of rivers according to the hydrographic zoning of Ukraine. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*. 2 (53), 6-20. DOI: http://nbuv.gov.ua/UJRN/glghge_2019_2_3 [in Ukrainian]
16. Mudra, K. V. (2019). Main characteristics of the water regime of the rivers of the Dniester basin under climate change conditions: author's abstract of dissertation ... candidate of geographical sciences: 11.00.07. Kyiv Taras Shevchenko National University. Kyiv. 21 [in Ukrainian].
17. Mudra, K. V. (2018). Analysis of the long-term dynamics of fluctuations in the Dniester River flow and its tributaries. *Physical Geography and Geomorphology*. 3 (91), 15-20. [in Ukrainian]
18. Ovcharuk, V. A., Todorova, O. I., Prokofiev, O. M. (2017). Maximum runoff of rain floods of rivers of mountainous Crimea under conditions of active influence of the subsoil. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*. 4 (47). 29-35. DOI: http://nbuv.gov.ua/UJRN/glghge_2017_4_4 [in Ukrainian]
19. Project of the ENVSEC initiative "Reducing vulnerability to extreme floods and climate change in the Dniester River basin" (2012). S. Krakovskaya, V. Balabukh, L. Gorbacheva, Yu. Nabivanets. Kyiv: UkrHMI. 118 [in Ukrainian].
20. Susidko, M. M. (1973). Dependence of characteristics of maximum water discharges of rain floods in the Dniester basin on landscape conditions. *Proceedings of UkrNDHMI*. 123. 100-118 [in Ukrainian]
21. Susidko, M. M. (1974). Study of cyclic variations of rainfall runoff in the Dniester basin. *Proceedings of UkrNDHMI*. 127, 16-37. [in Ukrainian]
22. Susidko, M. M., Lukianets, O. I. (1999). Floods in the Carpathians – causes of their occurrence and recurrence // *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Natural Phenomena in the Carpathians"*. Rakhiv. 316-321. [in Ukrainian]
23. Susidko, M. M., Polyakova, S. O., Shcherbak, A. V. (2006). Catalog of characteristics of rain and snow-rain floods on the rivers of the Carpathian region for 1989–2002. *Scientific works of UkrNDHMI*. 255. 299-310. DOI: https://old.uhmi.org.ua/pub/np/255/12_Susid_Pol_Sherbak.pdf [in Ukrainian]
24. Gorbachova, L., Nabyvanets, Yu. (2012). Forecasted estimations of runoff change in the Dniester Basin under conditions of climate change. *EGU Leonardo, Hydrology and Society*, November 14th – 16th. Torino, Italy. 87.

25. Grebin, Vasyi, Mudra, Kateryna (2018). *Forecasting the Runoff on Rivers of the Dnister River Basin According to the Remo Numeric Climatic Model*. World Science. Multidisciplinary Scientific Edition. №9 (37). 26-32.
26. Luk'yanets, O., Sossedko, M. (1998). *Die Abflussbewertung auf nächste Jahre in den Karpaten unter Berücksichtigung der mehrjährigen Abflussschwankungen // Sammelband der XIX. Konferenz der Donauländer. Osijek (Kroatien)*. 393-401 [in German].
27. Moskalenko, S., Malyska, L. (2021) *Peak maxima on the rivers of the Prut and Siret basins (within Ukraine)*. *Acta Hydrologica Slovaca*, 22, 2, 177–186. DOI: https://doi.org/10.31577/ahs-2021_0022.02.0021
28. Obodovskyi Oleksandr, Lukianets Olga (2017). *Patterns and Forecast of Long-term Cyclical Fluctuations of the Water Runoff of Ukrainian Carpathians Rivers*. *Scientific Journal of Environmental Research, Engineering and Management*, 73, 1. Kaunas, KTU. 33-47. DOI: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.erem.73.1.15799>
29. Lukianets Olga and Obodovskyi Iurii (2015). *Spatial, Temporal and Forecast Evaluation of Rivers' Streamflow of the Drainage Basin of the Upper Tisa under the Conditions of Climate Change*. *Scientific Journal: Environmental Research, Engineering and Management*, No. 71(1). Kaunas, KTU. P. 36-46. DOI: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.erem.71.1.10286>
30. Lukianets Olga (2017). *Stochastic regularities of long-term fluctuation of average annual runoff of rivers of Tisza river basin (within the Ukraine)*. *Electronic Book with full papers from XXVII Conference of Danubian Countries on the hydrological forecasting and hydrological bases of water management*. 26-28 September, Golden Sands, Bulgaria. 280-290.
31. OSCE/UNECE Project: *Transboundary Co-operation and Sustainable Management of the Dniester River TRANS-BOUNDARY DIAGNOSTIC STUDY FOR THE DNIESTER RIVER BASIN*. November 2005. DOI: <https://www.osce.org/ukraine/104057?download=true>
32. Shendrik, S. P. Sosedko, M. M. Lukianets, O. I. (1996). *An attempt to more accurately determine the probability of maximum storm flood runoff*. XVIII. Conference of the Danube Countries. Graz, August, 19/1 TU [in German].
33. Stanislav, Moskalenko, Liudmyla, Malyska (2024). *Estimation of the limiting intensities of processes forming maximum water runoff in the Tisza and Prut river basins within Ukraine*. *Hydrological Processes, Ecosystems and Climate Change*. E-Book, IH SAS, Bratislava, 121-129. DOI: https://1778df732d.cdvaw-cdnwnd.com/464163c6c58a7760d10c2dc0e217449b/200000721-6edad6edb0/E-Book%20of%20Pa-pers%20UH%20SAV_2024_11.11..pdf?ph=1778df732d

Received 31 January 2025

Accepted 20 March 2025

Використання земельних ресурсів для промислового будівництва (в межах Малинської ОТГ)

Володимир Пасько¹

к. геогр. н., доцент, кафедра економічної та соціальної географії,

¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна,

e-mail: pask_volf@ukr.net,  <https://orcid.org/0000-0001-9011-7218>;

Петро Масляк¹

д. геогр. н., професор, кафедра географії України,

e-mail: petro_maslyak@ukr.net,  <https://orcid.org/0009-0005-9532-1732>;

Сергій Уліганець¹

к. геогр. н., доцент, кафедра географії України,

e-mail: uliganecz@ukr.net,  <https://orcid.org/0000-0002-9960-6752>;

Уляна Шинкаренко¹

аспірантка кафедри географії України,

e-mail: ulya.shinkarenko11@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0001-7625-1947>

Стаття присвячена оцінці придатності земельних ділянок у межах Малинської ТГ для розміщення нових промислових об'єктів. З огляду на те, що стратегічні пріоритети громади передбачають розвиток різних галузей промисловості, постає питання щодо раціонального вибору територій: чи має громада обмежитися використанням наявних виробничих ресурсів, чи варто орієнтуватися на розширення інфраструктурного потенціалу? Враховуючи міський характер громади особливо актуальним є визначення перспективних земельних ділянок, які відповідають критеріям придатності для промислового будівництва. Передбачено, що ухваленню рішень має передувати аналіз містобудівної документації, екологічних та економічних показників. У дослідженні застосовано багатофакторну оцінку території на основі геопросторових критеріїв: віддаленість від транспортної мережі (виконання умови: відстань ≤ 200 м або відстань ≥ 1200 м), населених пунктів (відстань ≤ 1 км або відстань ≥ 11 км), параметрів рельєфу (похил місцевості: $15^{\circ} \leq \text{заданий похил} \leq 18^{\circ}$) та землекористування (бальна оцінка наявних категорій земель від 0-5). За результатами аналізу встановлено, що землі промислового призначення складають майже 1% (5,71 км²) від загальної площі класифікованих земель. Натомість було ідентифіковано 12 км² перспективних ділянок, придатних для розширення промислової структури громади. Варто зазначити, що запропоновані території під будівництво відповідають встановленим умовам, що не порушують якість життя місцевих мешканців, зміну навколишнього середовища, а також є сприятливими для можливих інвесторів та бізнесу. Крім того, громада охоплює 77 сільських населених пунктів, частина з яких є практично не заселеними, що створює потенційні умови для подальших досліджень, за умови зміни адміністративно-територіального устрою з базового рівня (територіальної громади) до локального (конкретний населений пункт). Відповідні дії дозволять у подальшому ідентифікувати та оцінити конкретні земельні ділянки. У рамках проведеного аналізу на рівні громади було встановлено «проектні» території промислового використання, що можуть становити інтерес для місцевої влади та зацікавлених осіб.

Ключові слова: Малинська ОТГ, землекористування, планування, стратегія, територіальна громада, промисловість, будівництво, ресурси.

Як цитувати: Пасько Володимир, Масляк Петро, Уліганець Сергій, Шинкаренко Уляна (2025). Використання земельних ресурсів для промислового будівництва (в межах Малинської ОТГ). Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (62), 287-297. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-21>

In cites: Pasko Volodymyr, Maslyak Petro, Uliganets Serhii, Shynkarenko Ulyana (2025). Use of land resources for industrial construction (within Malynska UTC). Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (62), 287-297. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-21> [in Ukrainian]

Постановка проблеми. Урбанізаційні процеси, розширення виробничої інфраструктури та інтенсивна забудова територій у межах територіальної громади часто спричиняють трансформацію структури землекористування і впливають на стан навколишнього природного середовища. Відповідно виникає потреба у науково обґрунтованому аналізі характеристик місцевості, придатної для розміщення нових виробничих об'єктів або промислових підприємств. Такий аналіз є необхідним етапом планування проектної діяльності та може здійснюватися як фахівцями органів місцевого самоврядування, так і інвесторами чи

науковцями, зацікавленими в раціональному використанні територіального ресурсу. З одного боку, необхідно враховувати потреби замовника щодо наближеності об'єкта до критично важливих і часто дефіцитних ресурсів – транспортної інфраструктури, інженерних мереж, трудового потенціалу. З іншого – важливо мінімізувати антропогенний вплив на довкілля, природні ресурси та екосистемні послуги, що становлять основу сталого розвитку громади. Відповідно, на етапі вибору земельних ділянок у межах, наприклад, Малинської ТГ, які потенційно можуть використовуватися для розміщення виробничої інфра-

структури і водночас відповідати суспільним очікуванням щодо збалансованого землекористування, доцільно здійснювати комплексний територіальний аналіз.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Оцінка земельних ресурсів для внутрішньогосподарського планування різних видів діяльності є важливим питанням, яке детально розглядається як в українських, так і в закордонних наукових працях. Дослідники зауважують на важливості адаптації оцінки землекористування до особливостей діяльності та масштабу охоплення - національного, регіонального, субрегіонального чи місцевого рівня. Кожен вчений, залежно від своїх наукових інтересів та методологічного підходу, пропонує індивідуальну систему критеріїв для оцінки придатності земель [5,7,8,15,22]. В Україні значна увага приділяється оцінці будівельних проектів, особливо з точки зору їх впливу на навколишнє середовище [1-4;11,16,21]. Окрім аналізу території на придатність під певні напрями використання, важливими є питання управління територіальними ресурсами. З урахуванням того, що в Україні активно проходить процес напрацювання стратегій, планів розвитку для територіальних громад, чимало фахівців залучені до розробки довгострокового бачення розвитку території. Насамперед, досвід наукових співробітників дозволяє визначити найкращі варіанти для ефективного функціонування громади, моделюючи різні сценарії розвитку [9,12,19,20]. Додатковою темою, що посилює переваги для диверсифікації економіки і відповідно появи нових об'єктів промислового будівництва є соціально-економічне становище територій. Таким чином, актуальними наразі є роботи, що спрямовані на аналіз поточних ресурсів, їх стану та перспектив розвитку, особливо, з початком повномасштабного вторгнення рф в Україну. Кожна територіальна громада має свої особливості, які впливають на траєкторію її розвитку. Незалежно від того, характеризується вона сільськогосподарським потенціалом, промисловою спадщиною, близькістю до природних ресурсів або потужним ринком праці, ці фактори мають бути враховані при формуванні стратегії розвитку.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Адміністративно-територіальна реформа, проведена в рамках політики децентралізації в Україні, зумовила формування територіальних громад як базової ланки просторового управління [10]. Органи місцевого самоврядування отримали повноваження щодо розробки генеральних планів, схем зонування та стратегій розвитку. Станом на сьогодні громади мають інституційні механізми для корегування місцевої політики землекористування та містобудування з урахуванням власної спеціалізації.

Якщо у стратегії розвитку громади задекларована орієнтація на виробничий сектор, актуальним стає питання попереднього оцінювання земельних ділянок, придатних для промислового будівництва. Ще одним важливим аспектом щодо узгодження просторового планування є статус громади. Міські територіальні громади мають більше обмежень щодо розміщення промислових об'єктів, адже близькість до густонаселених районів може призвести до проблем із погіршенням здоров'я, загальним станом навколишнього середовища, утилізацією будівельних відходів тощо. При плануванні промислових об'єктів важливо враховувати буферні зони між житловими, комерційними чи рекреаційними територіями. Адже, покращення соціально-економічного становища ОТГ не має йти в розріз з еколого-орієнтованими підходами щодо розвитку місцевості. Відповідно, експертиза території потребує формування набору критеріїв, які дають змогу попередньо оцінити (не) наявність найбільш придатних місць під будівництво. Передпроектний етап будівництва на базовому рівні передбачає вивчення структури землекористування, що дає змогу визначити наявні категорії земель та доцільність їх забудови. Таким чином, у контексті просторового розвитку територіальних громад недостатньо опрацьованим залишається саме практичний аспект, який передбачає створення механізму ідентифікації земель з чітко визначеними критеріями під потреби будівництва.

Формулювання мети статті. Оцінка придатності земельних ділянок міської ТГ для розміщення промислових об'єктів на основі просторово-географічних та соціо-економічних критеріїв, з урахуванням обмежень землекористування та потенціалу території для подальшої забудови.

Виклад основного матеріалу дослідження. У Стратегії розвитку Малинської міської територіальної громади до 2027 року визначено пріоритетні напрями розвитку, що стосуються таких питань як модернізація промислових об'єктів, підтримка місцевого бізнесу, залучення інвестицій, покращення стану навколишнього середовища тощо [17]. Малин як центр новоствореної громади є промисловим містом, діяльність якого зосереджена на видобутку корисних копалин, розробці кар'єрів, лісовому господарстві, деревообробці та виробництві харчових продуктів. Вказаний перелік галузей є важливим для місцевої економіки, разом з цим формує нагальну потребу в оцінці спроможності громади. Адже її орієнтованість на промислову діяльність піднімає вагомі питання щодо наявності та придатності земельних ресурсів для подальшого розвитку. Чи достатньо в межах громади територій для розміщення нових промислових об'єктів, і наскільки ці тери-

торії придатні з екологічної, логістичної та економічної точок зору? Якщо певні промислові підприємства потребують переміщення з метою оптимізації ефективності або зменшення впливу на житлові зони, чи є в наявності альтернативні землі, які можуть задовольнити ці вимоги? Розгляд варіантів розвитку громади передбачає комплексний підхід. Навіть якщо в існуючій стратегії не зазначено будівництво конкретного об'єкту, здатність залучати інвестиції та проводити заходи щодо посилення розвитку залежать від конкурентоспроможності та ресурсів, якими можна зацікавити потенційних представників бізнесу. Окрім, цього з 1 січня 2025 року в Україні набула чинності нова вимога до містобудівної документації місцевого рівня для територіальних громад, що передбачає розробку Комплексного плану розвитку. За даним планом має бути встановлено чіткі правила зонування та впорядкування землеустрою. Передбачається, що коли потенційний інвестор звертається до громади, йому буде запропоновано вибір земельних ділянок, конкретно визначених у межах промислової зони (на нашому прикладі). Якщо ці ділянки не відповідатимуть вимогам інвестора, це свідчитиме про неможливість вста-

новлення співпраці. У цьому контексті особливої актуальності набуває наше дослідження щодо проектування потенційних зон для промислового розвитку. Провівши комплексне дослідження можливих ділянок під виробничу діяльність, ми можемо запропонувати громадам готовий до використання аналіз. Проведення такої підготовчої роботи дає можливість місцевим органам влади раціонально використовувати територіальні ресурси.

Малинська міська громада (Житомирська область, Коростенський район) була утворена 24.10.2020 року згідно з розпорядженням КМУ № 711-р від 12 червня 2020 року «Про визначення адміністративних центрів та затвердження територій територіальних громад Житомирської області» [13]. Станом на 2025 рік міська територіальна громада охоплює 77 населених пунктів, де проживає близько 38 тис. осіб, площа становить 1156,1 км² [14]. Станом на початок 2023 року в громаді було зареєстровано 758 юридичних осіб господарювання і 1655 фізичних осіб підприємців. Відповідно до сервісу OpenDataBot було проведено класифікацію підприємств громади за кількістю тих, що занесені до реєстру (див. табл. 1) [18].

Таблиця 1 / Table 1

Класифікація об'єктів інфраструктури Малинської ОТГ (станом на початок 2025 року) /
Classification of infrastructure objects in the Malynska UTC (as of the beginning of 2025)

Категорія підприємств та організацій	Кількість населених пунктів	Загальна кількість підприємств	Населений пункт, що був віднесений
Відсутні	24	0	Гуска, Рудня-Вороб'ївська, Савлуки, Соснівка, Студень, В'юнище, Жабоч, Нове Життя, Свиридівка, Тарасівка, Баранівка, Клітня, Нова Гута, Першотравневе, Різня, Рудня-Калинівка, Вороб'ївщина, Дружне, Зелений Гай, Королівка, Рубанка, Рутвянка, Трудолюбівка, Яблунівка
Незначні (до 5)	28	38	Білий Берег, Єлівка, Косня, Нова Рутвянка, Нянківка, Привітне, Ярочище, Зибин, Лумля, Щербатівка, Рудня-Городищенська, Стара Гута, Гута-Логанівська, Ободівка, П'ятидуб, Юрівка, Буки, Лісна Колона, Сичівка, Тростяниця, Березине, Бучки, Мар'ятин, Нова Діброва, Новоселиця, Стасева, Фортунатівка, Ялцівка
Малі (від 5-10)	10	68	Вишів, Морозівка, Вишнянка, Будо-Вороб'ї, Іванівка, Візня, Гамарня, Старі Вороб'ї, Горинь, Устинівка
Середні (10-15)	7	90	Ксаверів, Недашки, Діброва, Заbrane, Нові Вороб'ї, Луки, Слобідка
Великі (15-20)	4	64	Ворсівка, Гранітне, Любовичі, Федорівка
Дуже великі (понад 20)	4	233	Малин, Українка, Малинівка, Піріжки
Загальна кількість	77	493	

Згідно із наведеною таблицею, куди було віднесено підприємства різних галузей (комунальної, транспортної, рекреаційної, соціальної тощо)

спостерігається, те, що близько 32% населених пунктів не мають жодного підприємства на своїй території, що власне пояснюється не достатньою

кількістю населення. Наприклад, у с. Гуска проживає 25 осіб, у с. Зелений Гай 1 особа, у с. Нова Гута 19 людей, у с. Вороб'ївщина 5 жителів. Також вагома частка населених пунктів, майже 37% не мають значної чисельності активних підприємств. Позитивну ситуацію, щодо забезпеченості соціально-побутовими підприємствами мають лише 10% поселень, де знаходиться більше 15 установа.

Для того, щоб оцінити придатність території Малинської міської територіальної громади для гіпотетично можливого будівництва було проведено аналіз місцевості на основі наступних критеріїв: *величина похилу рельєфу, структура землекористування, близькість до транспортної мережі, віддаленість від існуючих населених пунктів*. На першому етапі дослідження було використано геопросторові дані з ресурсу OpenStreetMap, такі як межі (7) природоохоронних територій (nature_reserve), лісу (forest), сільськогосподарських угідь (farmland), житлової та комерційної забудови (residential; retail), автомобільних та залізничних шляхів (roads; railways), водних об'єктів (river; waterways), населених пунктів (place) [6]. Довкола зазначених шарів було створено буферні зони з наступними значеннями (у відповідності): 1 км, 50 м, 200 м, 500 м, 100 м, 500 м, 1 км (див. рис. 1). Визначення цих зон дозволяє інформувати спеціалістів з містобудування і девелоперів про території, на яких будівельну

діяльність слід обмежити або уникнути, сприяючи таким чином довгостроковій стійкості територіальної громади. Варто також відзначити, що на базовому рівні не затверджено документів чи нормативних актів, що регламентують необхідні відстані для розмежування між новоствореними об'єктами промисловості (чи будь-якими іншими) та вже існуючим земельним устроєм. Діючий ДБН Б.2.2 12:2019 «Планування і забудова територій» не містить конкретних метричних вимог щодо буферів (санітарно-захисних зон) для природних об'єктів – лісів, агроугідь, водних об'єктів чи об'єктів природно заповідного фонду. Раніше у проєктній практиці застосовувалися нормативи ДСанПіН 173 96 та ДСП 173 96, які встановлювали орієнтовні зони СЗЗ – від 50 м до 1000 м для об'єктів I–V класу шкідливості, але ці документи офіційно скасовані: ДСанПіН 173 96 втратила чинність у 2017 році, а ДСП 173 96 досі чинна, проте не містить буферних зон для природних об'єктів. З огляду на це, в межах даної роботи було запропоновано емпіричні буферні відстані, що враховують як просторові характеристики місцевості, так і прагнення уникнути потенційних конфліктів інтересів. Запропоновані довжини не суперечать існуючій забудові й не створюють перешкод для реалізації потенційного інвестиційного проєкту, а отже, можуть розглядатись як технічно доцільна основа для попереднього просторового планування.

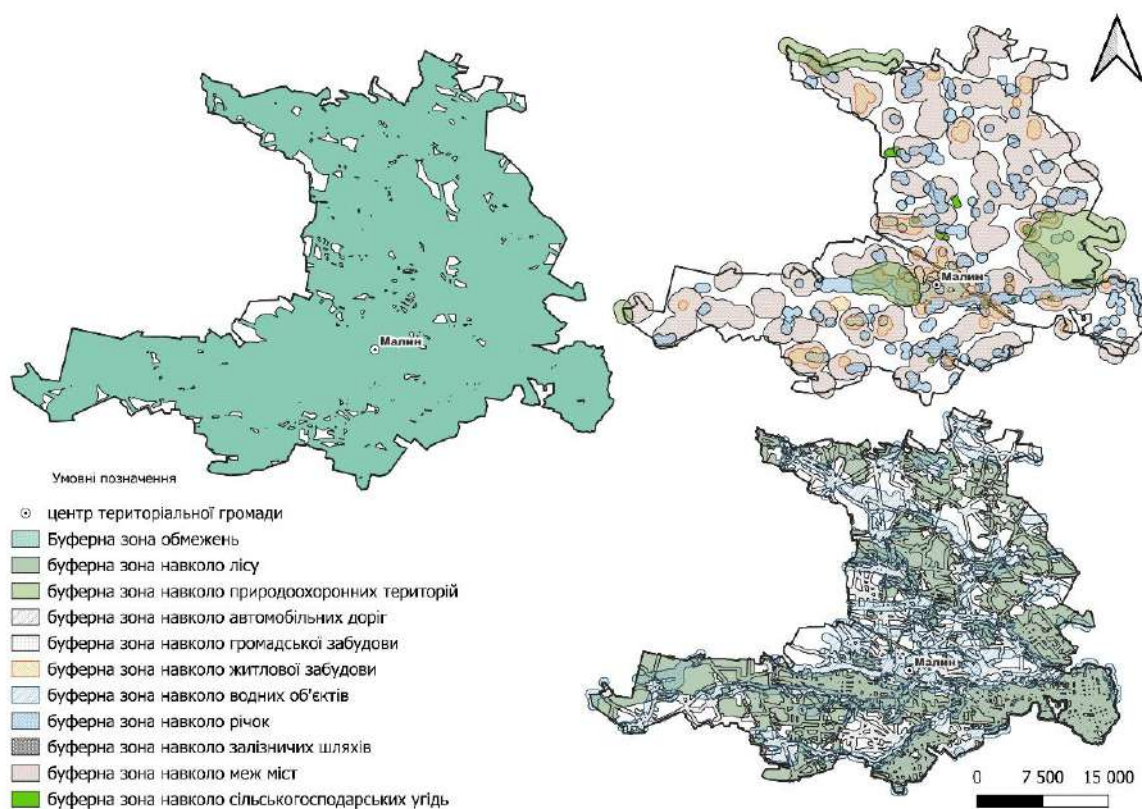


Рис. 1. Зони обмежень довкола меж землекористування (складено авторами у середовищі QGIS) /
Fig. 1. Restriction zones around land use boundaries

З врахуванням відстаней, які були присвоєні кожному з елементів землекористування було створено загальний буфер обмежень, що дозволив наочно оцінити можливість забудови території. З представленої картосхеми можна детально побачити, що міська громада має доволі обмежені площі, які можуть бути розглянуті під потенційну будівельну діяльність. Більша частина територій, що відповідають зазначеним умовам знаходиться на периферії громади. На другому етапі дослідження було окремо проаналізовано перевагу транспортної мережі та віддаленості від населених пунктів, як змінні, що відіграють важливу роль у питаннях логістичних витрат, зменшення ризиків впливу на місцеве населення, доступу до міських

послуг. Відповідно за допомогою калькулятору растрів було задано функції, які допомогли визначити найбільш та найменш придатні ділянки (див. рис. 2).

У відповідності до наведених формул побудови растрових шарів, де кожній клітинці присвоюється значення залежно від її відстані до транспортної мережі / населених пунктів було задані певні умови. Наприклад, якщо відстань до дороги менша або дорівнює 200 м, значення клітинки дорівнює 0, і її можна розглядати як непридатну територію розташовану надто близько до транспортних шляхів, що має переваги для розміщення підприємства, але потенційно створюватиме шум для населення. Чим ближче клітинка до дороги в

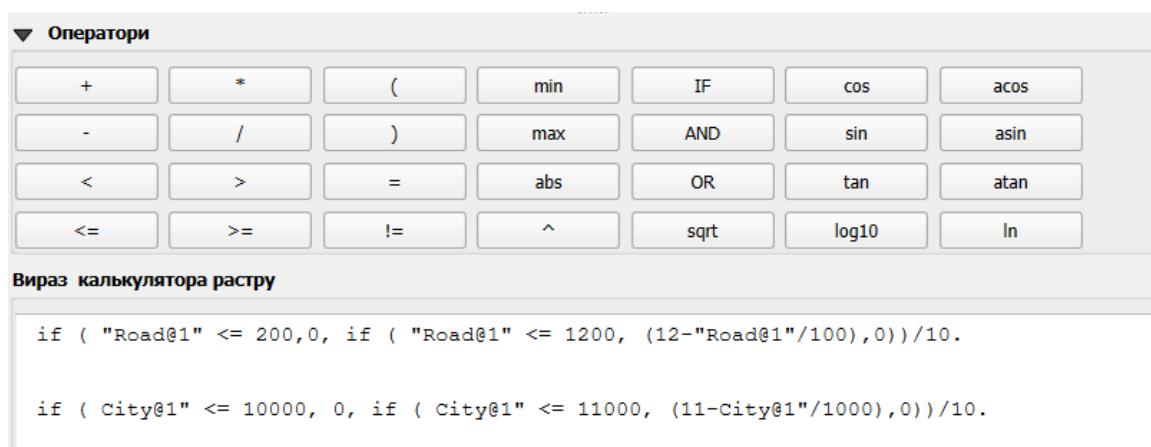


Рис. 2. Задана функція щодо оцінки окремих складових придатності території /
Fig. 2. The function for assessing the individual components of the territory's suitability is set

межах 200–1200 м, тим вища оцінка її придатності. Якщо відстань перевищує 1200 м, значення клітинки встановлюється на 0, що позначає територію надто віддалену від дороги. За другим критерієм встановлено наступні обмеження, якщо відстань до населеного пункту менша або дорівнює 10,000 м (10 км), значення клітинки дорівнює 0. Відповідно, територія під будівництво знаходиться занадто близько до населеного пункту і вважається непридатною для забудови. Якщо відстань перевищує 11 км, значення клітинки встановлюється на 0 і територія також є малопридатною, оскільки занадто віддалена від населених пунктів і не формує міцні зв'язки з інфраструктурою та установами сфери послуг. Цінність території знижується на кожен 1 км. Для зручної інтерпретації даних отримані значення було класифіковано від 0 до 1, де чим ближче значення до 1, тим перспективнішою є місцевість. Таким чином, згідно із заданими параметрами, можна виокремити північну та західну частини Малинської громади як найбільш належні для розміщення проєктованого об'єкту за транспортною доступністю; за показником відстані від населених пунктів задіяна практично вся площа громади, з її 77 се-

лами, за умови дотримання встановлених меж відступу (див. рис. 3).

На третьому етапі дослідження проводилося вивчення топографічних особливостей місцевості, через вимірювання похилу місцевості. Даний критерій є важливим з точки зору того, що допомагає зменшити обсяг технічних земляних робіт (зрізання шару ґрунту, вирівнювання поверхні тощо), економічних витрат (вискористання спеціалізованої техніки, довші терміни будівництва, додаткові матеріали), а також впливу на довкілля (втрата рослинності, терасування, прискорення ерозії). Для того, щоб оцінити, які території в межах громади є більш пріоритетними для забудови нами було обраховано показник схилу місцевості (0) та класифікованого його відповідним чином, де від 0⁰ до 3⁰-9 балів, 3⁰ до 6⁰-10 балів, 6⁰ до 9⁰-8 балів, 9⁰ до 18⁰-6 балів, 18⁰ до 25⁰-0 балів (див.рис.4). За заданим параметром виконувалася функція $15^0 \leq x \leq 18^0$. Відповідно значення менші за 15⁰, дозволяють проводити планування будівельної діяльності підприємства; більші за 18⁰ вказують на те, що природні умови рельєфу є не підходящими.

Згідно з отриманими даними було встановле-

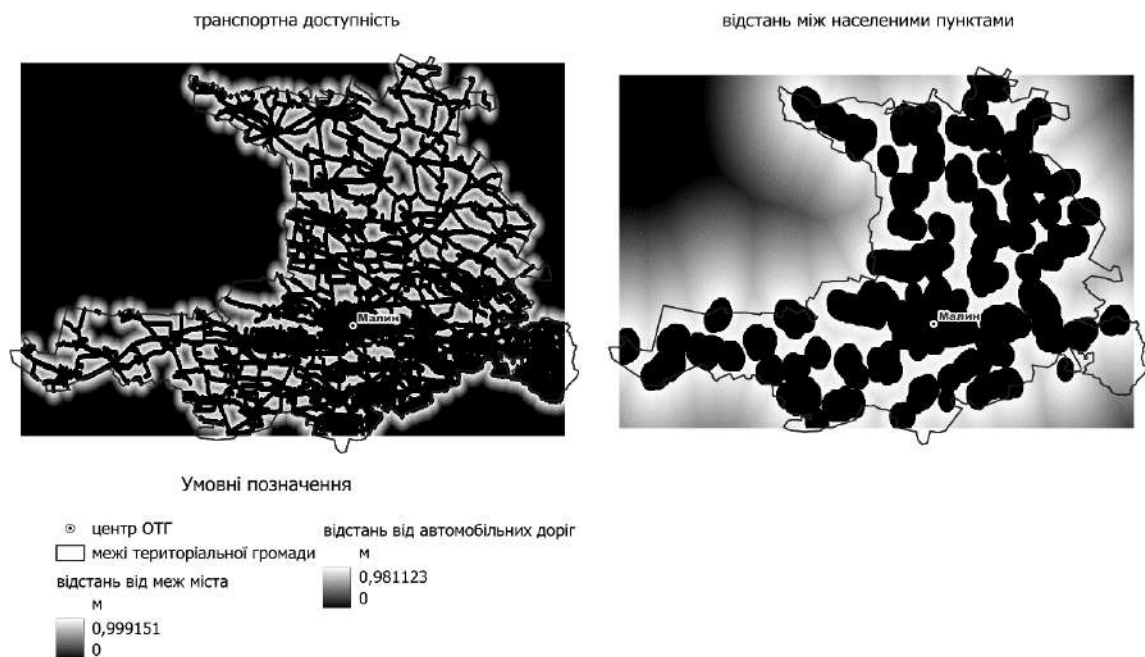


Рис. 3. Визначення оптимальної відстані для об'єкту будівництва /
Fig. 3. Determining the optimal distance for a construction project

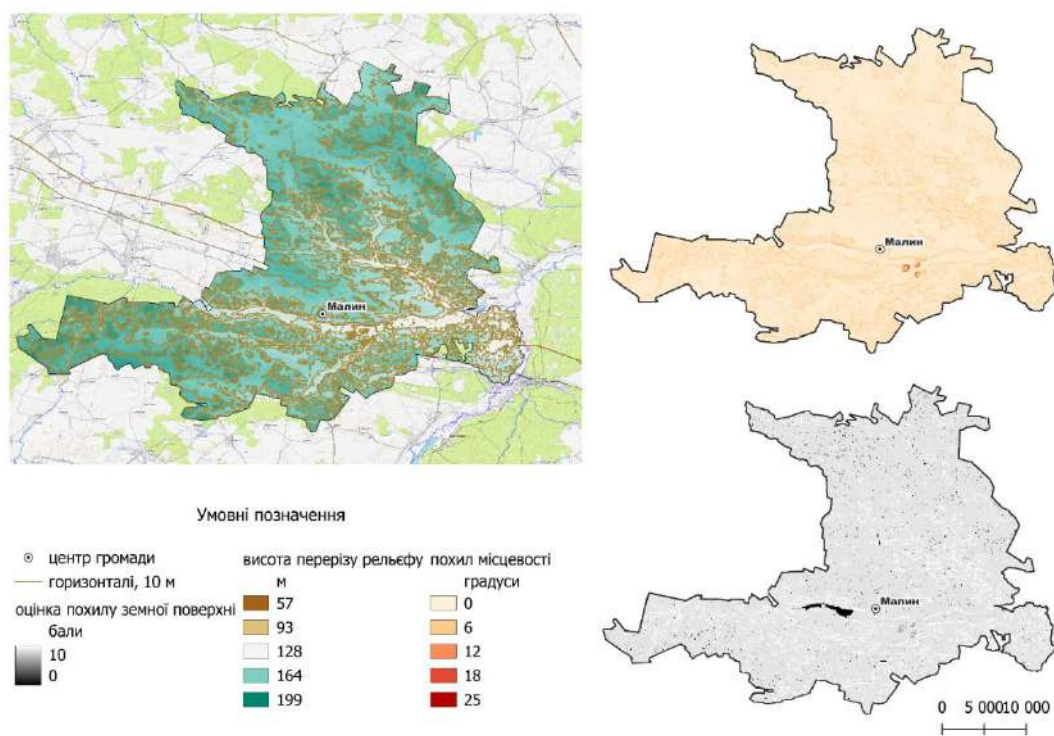


Рис. 4. Оцінка морфології Малинської територіальної громади /
Fig. 4. Assessment of the morphology of the Malyn territorial community

но, що поверхня землі ОТГ має хвилястий характер, де висоти коливаються від 50 метрів поблизу водних об'єктів (зниження в районі р. Ірша (Малинське водосховище), р. Возня (Ворсівське водосховище), р. Вирва, р. Різня до 200 м на північному-сході та півднінному-заході території. Висновки щодо похилу місцевості є прямо пропор-

ційними, де загальна тенденція практично не передбачає перепадів висот (до 5⁰). Проте, на картосхемі чітко виділяється зона у 5 км доступності від м. Малин, де територія перестає бути рівниною і похил зростає у 2 рази. На місцевості дана локація відповідає щебеневим кар'єрам від Малинського каменедробильного

заводу. Відповідно до бальної оцінки похилу місцевості (від 0 до 10) основна площа громади є придатною для будівництва, окрім, зони біля Малинського водосховища (позначена на карті чорним кольором).

Останнім етапом дослідження є фіналізація отриманих попередньо результатів по структурі

землекористування, похилу місцевості, відстані від транспортної мережі та населених пунктів. Перед тим, як звести всі дані в одну систему оцінки. Варто надати детальнішу характеристику земельному фонду Малинської громади. На рисунку 5 представлено типи земельних ділянок, що є наявними в межах ОТГ.

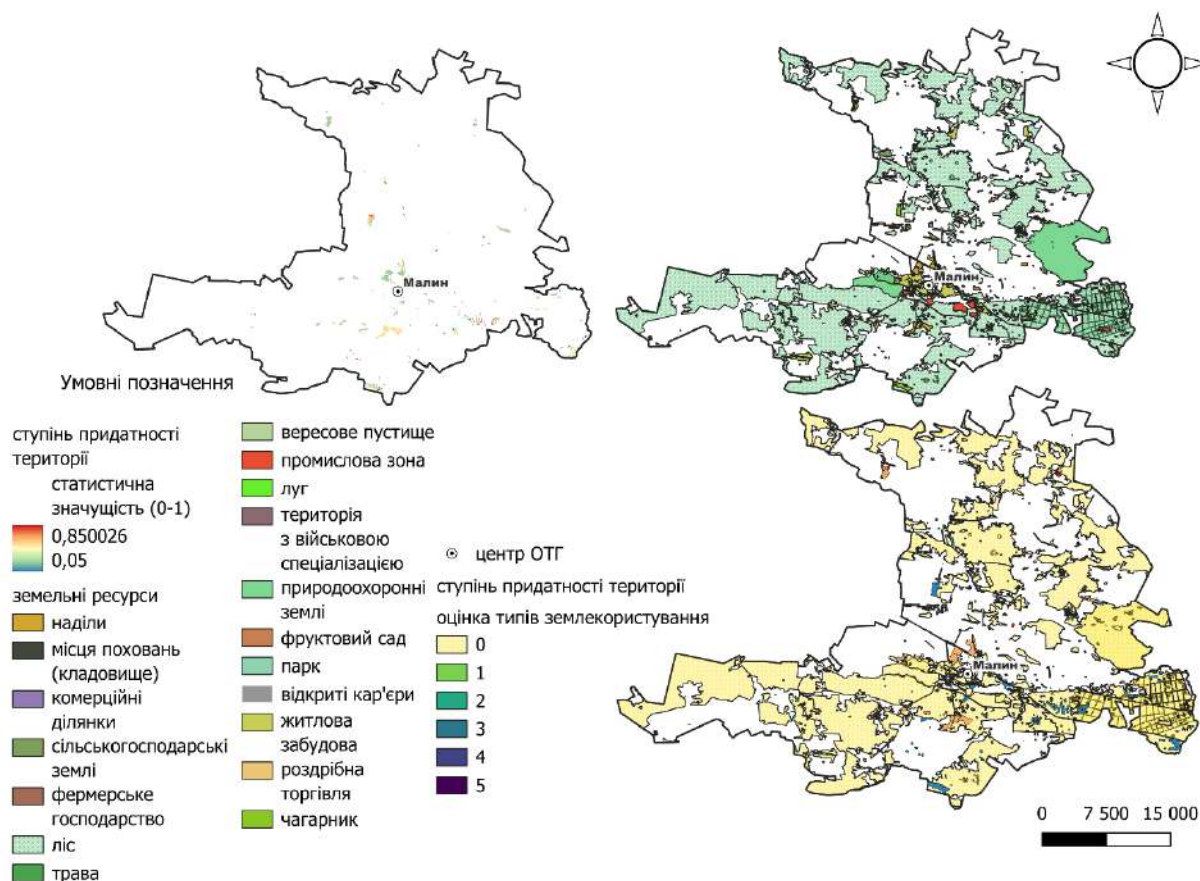


Рис. 5. Оцінка території з метою вибору місця під будівництво промислового об'єкту /
Fig. 5. Assessment of the territory for the purpose of selecting a site for the construction of an industrial facility

Наразі, переважаючими категоріями земель виступають ті, що зайняті під лісовою рослинністю, парками, промисловістю, земельними наділами під комерційну діяльність. Зважаючи на це, нами було класифіковано усі типи землекористування за допомогою бальної шкали, де фермерське господарство має 1 бал (farmyard), 2 бали наділи (allotments), 3 бали трава (grass), 4 бали луг (meadow), 5 балів вересове пустище (heath), 0 балів (cemetery, industrial, retail, forest, commercial, farmland, military, nature reserve, orchard, park, quarry, residential, retail). Бальна шкала типів землекористування сформована не на основі ступеня поточної підготовки ділянки до забудови, а з урахуванням потенційної легкості трансформації земель під промислове використання. Наприклад, луги, попри відсутність існуючої інженерної інфраструктури, отримали вищу оцінку (4 бали), оскільки вони, як правило, не є включеними до

активного сільськогосподарського або житлового обороту, не мають складних форм власності, забудови чи угідь постійного користування, що ускладнюють зміну цільового призначення. Навпаки, фермерські господарства, хоч і мають під'їзні шляхи чи споруди, часто є інтегрованими у виробничо-господарські системи, зміна яких потребує додаткових погоджень, компенсацій або правового втручання. Відповідно, 0 балів відведені під території, які є найбільш не придатними для планування будівельної діяльності, чим вищим є бал, тим більше земельна ділянка підлягає під промислові заходи. Аналіз даних з ресурсу OpenStreetMap дозволив здійснити обрахунки для кожної з категорій земель, у розрізі Малинської громади. Відповідно, земельні ресурси розподілені наступним чином, наділи 5,22 км², місця поховань (кладовище) 0,63 км², комерційні землі 0,33 км², сільськогосподарські угіддя 2,36 км²,

фермерське господарство 0,37 км², ліс 558,51 км², трава 0,07 км², вересове пустище 1,93 км², промислова зона 5,71 км², луг 0,05 км², природоохоронні території 47,43 км², фруктовий сад 1,67 км², парк 0,39 км², відкриті кар'єри 1,54 км², житлова зона 16,33 км², роздрібна торгівля 0,03 км², чагарник 9,20 км². Загальна площа описаних земель становить 651,37 км² (58%). Прирівнюючи дане значення до загальної площі громади (1 125 км²) виходить, що ми отримуємо частку біля 42% вільних земель для розміщення промислового виробництва. Оскільки 5,71 км² (0,87%) наразі визначено як землі промисловості, є можливість розширити індустріально-виробничі зони для підтримки економічного зростання, залучення інвестицій та створення робочих місць.

Для того, щоб оцінити потенціал землекористування у розрізі ділянок, які не потрапили у загальний буфер обмежень було здійснено обрахунки за формулою, яка інтегрувала в себе 4 просторові фактори з присвоєнням вагових коефіцієнтів: відстань від транспортних шляхів-0,25, населених пунктів-0,30, похил місцевості-0,20 та земельні ресурси-0,25. Загальна вага цих коефіцієнтів дорівнює 1,00, що дозволяє ранжувати території від найбільш до найменш придатних для організації будівельного виробництва. Коефіцієнти обґрунтовані логікою просторового планування:

Найвища вага (0,30) надається відстані до населених пунктів, оскільки це безпосередньо впливає на:

- екологічну безпеку населення (санітарно-захисні зони),
- соціальну напругу,
- сумісність з функціональним зонуванням.

Іншими словами, розміщення промислового об'єкта в безпосередній близькості до житлових зон є найбільш ризикованим та обмеженим з точки зору регуляторних і соціальних норм.

Відстань до транспортних шляхів (0,25) є другим за важливістю фактором, оскільки впливає на:

- логістику,
- витрати на підведення інфраструктури,
- доступність для працівників та ресурсів.

Земельні ресурси (0,25) оцінюються з урахуванням потенціалу ділянки до трансформації під промислове використання (згідно з раніше описаною бальною шкалою), що є важливим чинником при прийнятті рішень, однак передбачає здійснення як технічного переоснащення, так і зміни правового статусу землі.

Похил місцевості (0,20) має меншу вагу – складні топографічні умови можуть суттєво впли-

нути на вартість будівництва, однак за наявності ресурсів (технічних, інженерних, фінансових) може бути мінімізований.

Отримані результати свідчать про те, що локалізація ділянок, які можуть бути відведені під об'єкт промисловості знаходиться на окраїнах територіальної громади. Відповідно до геопросторового розташування земельних ділянок, які вдалося виявити за допомогою аналізу можна відмітити їх концентрацію на північному заході від міста Малин та в його радіусі. Кількість таких ділянок складає 217, із розмірами комірок на карті від 0,01-1,02 км². Загальна площа виділених територій становить 12,48 км². Більша частина міської громади, не відповідає заданим параметрам щодо будівництва.

Висновки. На основі аналізу стратегічного документу розвитку Малинської ОТГ та оцінки структури земельного фонду було здійснено просторове дослідження з метою виявлення ділянок, придатних для розміщення промислових об'єктів. Враховуючи, що 66% (25 172 особи) населення громади проживає в її адміністративному центрі – місті Малин, первинні припущення могли б свідчити про обмежений потенціал для індустріального розвитку через високу густоту населення. Проте детальніший аналіз показав, що значна частина території охоплює 77 сільських населених пунктів, багато з яких малозаселені, що відкриває перспективи для промислового освоєння в умовах дотримання екологічних обмежень. Оцінка землекористування передбачала багатофакторний підхід із побудовою буферних зон «чутливих» до промислового впливу – природоохоронні території, ліс, сільськогосподарські угіддя, житлова та комерційна забудови, автомобільні та залізничні шляхи, водні об'єкти, населені пункти. Запропонований алгоритм з 4 етапів дослідження дозволив сформулювати просторову модель придатності земель із урахуванням функціонального зонування, ландшафтних характеристик та демографічної структури. Результати дослідження вказують на наявність понад 12 км² територій, які відповідають критеріям для перспективного промислового використання. Просторовий аналіз дозволив ідентифікувати ці ділянки як потенційні осередки для розміщення нових підприємств або релокації наявних виробництв із густонаселених зон. Запропонована методологія є актуальною для органів місцевого самоврядування, зокрема в контексті переходу до екологічно стійких форм промислового розвитку та раціонального просторового планування.

Список використаних джерел

1. Banihashemi, S. A., Eskandar, H., Sadjadi, S. J., & Kazemipoor, H. (2021). Investigating the environmental impacts of construction projects in time-cost trade-off project scheduling problems with CoCoSo multi-criteria decision-making method. *Sustainability*, 13(19), 10922. <https://doi.org/10.3390/su131910922>
2. Cui, S., & Gong, Z. (2021). Research progress on environmental impact assessment of urban construction activities. *E3S Web of Conferences*, 237, 04017. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123704017>
3. Kaja, N., & Goyal, S. (2023). Impact of construction activities on the environment. *International Journal of Engineering Technologies and Management Research*, 10(1), 17–24. <https://doi.org/10.29121/ijetmr.v10.i1.2023.1277>
4. Kumar, V., Kochhar, N. K., Sharma, A., & Singh, A. P. (2024). Environmental impact assessment of mass timber, structural steel, and reinforced concrete buildings based on the 2021 international building code provisions. *Building and Environment*, 251, 111195. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111195>
5. Morales, F., & de Vries, W. T. (2021). Establishment of land use suitability mapping criteria using analytic hierarchy process (AHP) with practitioners and beneficiaries. *Land*, 10(3), 235. <https://doi.org/10.3390/land10030235>
6. OpenStreetMap. (n.d.). OpenStreetMap. <https://www.openstreetmap.org/#map=6/48.54/31.17>
7. Ostojic, I., & Glazar, T. (2014). Criteria for evaluation and guidelines for land use planning. *Igra Ustvarjalnosti – Creativity Game*, 2014, 24–32. <https://doi.org/10.15292/iu-cg.2014.02.024-032>
8. Stanitsas, M., Kirytopoulos, K., & Leopoulos, V. (2021). Integrating sustainability indicators into project management: The case of the construction industry. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123774. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123774>
9. Бурик, З. (2020). Стратегічне планування розвитку територій як інструмент управління. *Публічне урядування*, 5(25), 53–62. [https://doi.org/10.32689/2617-2224-2020-5\(25\)-53-62](https://doi.org/10.32689/2617-2224-2020-5(25)-53-62)
10. Верховна Рада України. (2020, 16 квітня). Про внесення змін до деяких законів України щодо визначення територій та адміністративних центрів територіальних громад: Закон № 562-IX (станом на 7 вересня 2023 р.). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/562-20#Text>
11. Гудима, Л. (2024). Імплементація стандартів екологічного будівництва як чинник сталого розвитку держави. *Економіка та суспільство*, 60, <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-60-102>
12. Есманов, О., Штика, Ю., & Линник, М. (2024). Принципи стратегічного планування розвитку територій. *Цифрова економіка та економічна безпека*, 2(11), 84–88. <https://doi.org/10.32782/dees.11-13>
13. Кабінет Міністрів України. (2020, 12 червня). Про визначення адміністративних центрів та затвердження територій територіальних громад Житомирської області: Розпорядження № 711-р. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/711-2020-p#Text>
14. Коростенська районна державна адміністрація. (2021). Малинська територіальна громада. <https://korostenska-rda.gov.ua/malinska-teritorialna-gromada-11-44-20-15-01-2021/>
15. Лашко, С., Шелковська, І., Міхно, П., & Козарь, В. (2021). Геодезичний і дистанційний моніторинг земель, відведених під сонячні електростанції. *Технічні науки та технології*, (2)(24), 257–264. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-2\(24\)-257-264](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-2(24)-257-264)
16. Майкович, В., & Адаменко, Я. (2024). Оцінка впливу утворення будівельних відходів на довкілля. *Екологічна безпека та природокористування*, 51(3), 33–46. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.3.33-46>
17. Малинська міська рада. (2024). Стратегія розвитку Малинської міської територіальної громади до 2027 року. https://malyn-rada.gov.ua/sites/default/files/photo/strategiya_malyn_13-01-2024.pdf
18. Оpendatabot. (n.d.). Малинська міська громада. <https://opendatabot.ua/c/UA18060130000061781>
19. Пастух, К. (2021). Стратегічне планування розвитку територіальних громад. *Науковий вісник: Державне управління*, 1(7), 195–215. [https://doi.org/10.32689/2618-0065-2021-1\(7\)-195-215](https://doi.org/10.32689/2618-0065-2021-1(7)-195-215)
20. Пасько, В., Уліганець, С., & Шинкаренко, У. (2024). Сільськогосподарське землекористування: перспективи агробізнесу в Ружинській територіальній громаді. *Конструктивна географія та раціональне використання природних ресурсів*, 5(2), 28–35. <https://doi.org/10.17721/2786-4561.2024.5.2.-4/8>
21. Прокопенко, В. І. (2015). Про критерії оцінювання ефективності збереження земельних ресурсів при відкритій розробці родовища. *Економічний вісник Національного гірничого університету*, (2), 183–190. http://nbuv.gov.ua/UJRN/evngu_2015_2_23
22. Хрутьба, В. О., Зюзюн, В. І., Барабаш, О. В., & Невєдров, Д. С. (2020). Формування системи критеріїв оцінки впливу на довкілля в проектах будівництва та реконструкції об'єктів критичної інфраструктури. *Вісник Національного транспортного університету. Серія: Технічні науки*, 1(46), 405–415.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Use of land resources for industrial construction (within Malynska UTC)

Volodymyr Pasko¹

PhD (Geography), Associate Professor, Department of Economic and Social Geography,

¹ Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine;

Petro Maslyak¹

DSc (Geography), Professor, Department of Geography of Ukraine;

Serhii Uliganets¹

PhD (Geography), Associate Professor, Department of Geography of Ukraine;

Ulyana Shynkarenko¹

PhD student at the Department of Geography of Ukraine

ABSTRACT

The article is devoted to assessing the suitability of land plots within the Malynska TG for the placement of new industrial facilities. Given that the community's strategic priorities include the development of various industries, the question arises regarding the rational choice of territories: should the community limit itself to using existing production resources, or should it focus on expanding its infrastructure potential? The **aim of the study** is assessment of the suitability of urban TC land plots for the placement of industrial facilities based on spatial-geographical and socio-economic criteria, taking into account land use restrictions and the potential of the territory for further development. Given the urban nature of the community, it is particularly important to identify promising land plots that meet the criteria for industrial construction. It is envisaged that decisions should be preceded by an analysis of urban planning documentation, environmental and economic indicators. The study applies a **methodology** of multifactorial assessment of the territory based on geospatial criteria: calculations of proximity to transportation networks (meeting the condition: distance ≤ 200 m or distance ≥ 1200 m), settlements (distance ≤ 1 km or distance ≥ 11 km), terrain slope ($150 \leq$ specified slope ≤ 180), and land use (scored from 0–5 based on land category assessments). The initial data consisted of shape files from OpenStreetMap, providing information on the area's general land use. The calculations revealed that industrial land accounts for nearly 1% (5.71 km²) of the total classified land area.

Through the analysis, an additional 12 km² of prospective land plots were identified, which allow for the expansion of the community's industrial territorial system. Moreover, the proposed construction sites meet established conditions, do not compromise the quality of life of local residents, minimize environmental changes, and are favorable for potential investors and businesses. It is also worth noting that the community includes 77 rural settlements, some of which are practically uninhabited. This condition serves as an additional factor for further research, particularly if administrative-territorial restructuring shifts from the basic level (territorial community) to the local level (specific settlements). The **scientific novelty** of this study lies in the comprehensive approach to assessing suitable territories for planned construction. An algorithm was developed that accounted for several factors determining the feasibility of planning activities, thereby reducing project implementation risks. This approach will facilitate future identification and evaluation of specific land plots. The **practical significance** lies in the fact that the analysis conducted at the level of the selected community, for which «project» territories for industrial use have been established, may be of interest to local authorities and stakeholders. The methodological approach outlined in this research can serve as a «model» for other communities striving to balance economic growth with sustainable land use. By focusing on a thorough examination of land fund distribution, local authorities can create industrial clusters that promote economic synergy, increase employment levels, and improve regional infrastructure.

Keywords: Malynska UTC, land use, planning, strategy, territorial community, industry, construction, resources.

References

1. Banihashemi, S. A., Eskandar, H., Sadjadi, S. J., & Kazemipoor, H. (2021). Investigating the environmental impacts of construction projects in time-cost trade-off project scheduling problems with CoCoSo multi-criteria decision-making method. *Sustainability*, 13(19), 10922. <https://doi.org/10.3390/su131910922>
2. Cui, S., & Gong, Z. (2021). Research progress on environmental impact assessment of urban construction activities. *E3S Web of Conferences*, 237, 04017. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123704017>
3. Kaja, N., & Goyal, S. (2023). Impact of construction activities on the environment. *International Journal of Engineering Technologies and Management Research*, 10(1), 17–24. <https://doi.org/10.29121/ijetmr.v10.i1.2023.1277>
4. Kumar, V., Kochhar, N. K., Sharma, A., & Singh, A. P. (2024). Environmental impact assessment of mass timber, structural steel, and reinforced concrete buildings based on the 2021 international building code provisions. *Building and Environment*, 251, 111195. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111195>
5. Morales, F., & de Vries, W. T. (2021). Establishment of land use suitability mapping criteria using analytic hierarchy process (AHP) with practitioners and beneficiaries. *Land*, 10(3), 235. <https://doi.org/10.3390/land10030235>
6. OpenStreetMap. (n.d.). OpenStreetMap. <https://www.openstreetmap.org/#map=6/48.54/31.17>
7. Ostojic, I., & Glazar, T. (2014). Criteria for evaluation and guidelines for land use planning. *Igra Ustvarjalnosti – Creativity Game*, 2014, 24–32. <https://doi.org/10.15292/iu-cg.2014.02.024-032>

8. Stanitsas, M., Kirytopoulos, K., & Leopoulous, V. (2021). Integrating sustainability indicators into project management: The case of the construction industry. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123774. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123774>
9. Buryk, Z. (2020). Strategic planning for the development of territories as a management tool. *Public Management*, 5(25), 53–62. [https://doi.org/10.32689/2617-2224-2020-5\(25\)-53-62](https://doi.org/10.32689/2617-2224-2020-5(25)-53-62) [in Ukrainian]
10. Verkhovna Rada of Ukraine. (2020, April 16). On amendments to certain laws of Ukraine on determining the territories and administrative centers of territorial communities: Law No. 562-IX (as of September 7, 2023). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/562-20#Text> [in Ukrainian]
11. Hudyma, L. (2024). Implementation of environmental construction standards as a factor of sustainable development of the state. *Economy and Society*, 60, <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-60-102> [in Ukrainian]
12. Esmanov, O., Shtyka, Y., & Lynnyk, M. (2024). Principles of strategic planning for territorial development. *Digital Economy and Economic Security*, 2(11), 84–88. <https://doi.org/10.32782/dees.11-13> [in Ukrainian]
13. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2020, June 12). On determining administrative centers and approving the territories of territorial communities of Zhytomyr region: Decree No. 711-r. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/711-2020-p#Text> [in Ukrainian]
14. Korosten District State Administration. (2021). *Malynska Territorial Community*. <https://korostenska-rda.gov.ua/malynska-teritorialna-gromada-11-44-20-15-01-2021/> [in Ukrainian]
15. Lashko, S., Shelkovska, I., Mikhno, P., & Kozar, V. (2021). Geodetic and remote monitoring of lands allocated for solar power plants. *Technical Sciences and Technologies*, (2)(24), 257–264. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-2\(24\)-257-264](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-2(24)-257-264) [in Ukrainian]
16. Maikovich, V., & Adamenko, Y. (2024). Assessment of the environmental impact of construction waste generation. *Ecological Safety and Nature Management*, 51(3), 33–46. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.3.33-46> [in Ukrainian]
17. Malyn City Council. (2024). Development strategy of the Malynska urban territorial community until 2027. https://malyn-rada.gov.ua/sites/default/files/photo/strategiya_malyn_13-01-2024.pdf [in Ukrainian]
18. Opendatabot. (n.d.). Malynska Urban Community. <https://opendatabot.ua/c/UA18060130000061781> [in Ukrainian]
19. Pastukh, K. (2021). Strategic planning for the development of territorial communities. *Scientific Bulletin: Public Administration*, 1(7), 195–215. [https://doi.org/10.32689/2618-0065-2021-1\(7\)-195-215](https://doi.org/10.32689/2618-0065-2021-1(7)-195-215) [in Ukrainian]
20. Pasko, V., Uliganets, S., & Shynkarenko, U. (2024). Agricultural land use: Prospects for agribusiness in the Ruzhynska territorial community. *Constructive Geography and Rational Use of Natural Resources*, 5(2), 28–35. <https://doi.org/10.17721/2786-4561.2024.5.2.-4/8> [in Ukrainian]
21. Prokopenko, V. I. (2015). On the criteria for assessing the effectiveness of land resource conservation in open-pit mining. *Economic Bulletin of the National Mining University*, (2), 183–190. http://nbuv.gov.ua/UJRN/evngu_2015_2_23 [in Ukrainian]
22. Khrutba, V. O., Ziuziun, V. I., Barabash, O. V., & Nevedrov, D. S. (2020). Formation of a system of environmental impact assessment criteria in construction and reconstruction projects of critical infrastructure facilities. *Bulletin of the National Transport University. Series: Technical Sciences*, 1(46), 405–415 [in Ukrainian]

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 3 January 2025

Accepted 7 March 2025

Analysis of the dynamics of the temperature regime of the North-Western Black Sea region in the context of global climate changes

Oleg Prokofiev^{1, 2}

PhD (Geography), Associate Professor, Head of Department of Meteorology and Climatology,

¹ Odesa I.I. Mechnikov National University, Odesa, Ukraine;

Senior Researcher, Department of Climate-Oriented Agricultural Technologies,

² Institute of Climate-Oriented Agriculture National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Hlibodarske, Odesa region, Ukraine,

e-mail: leggg0707@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0002-5669-0181>;

Liudmyla Goncharova¹

PhD (Geography), Associate Professor, Department of Meteorology and Climatology,

e-mail: goncharova.luda.50@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0002-6340-2424>

ABSTRACT

Formulation of the problem. This study aligns with UN Sustainable Development Goal No. 13 – Climate Action – by addressing key climate-related challenges impacting sustainable development in Ukraine. It focuses on analyzing the dynamics of temperature-dependent natural resource indicators in the North-western Black Sea region, a vital industrial-agricultural area. Understanding the thermal regime is essential for adapting socio-economic sectors to climate change. The research supports planning and resilience in southern Ukraine under changing climate conditions. It is part of projects at the Faculty of Hydrometeorology and Ecology, Odesa I.I. Mechnikov National University, including: 'Forecasting hazardous meteorological phenomena over the southern regions of Ukraine' (No. DR 00115U006532); 'Comprehensive probabilistic-forecasting modeling of extreme hydrological events on the rivers of southern Ukraine to ensure sustainable water use under climate change conditions' (No. DR 0121U010964); 'Zoning of Ukraine's territory based on vulnerability to climate change and selection of optimal adaptation pathways.' This work fills critical gaps in the study of regional climate dynamics.

Analysis of previous research it proves the importance of studying the climatic indicators of the temperature regime of the North-Western Black Sea region, which is a leading highly developed industrial-agricultural region of Ukraine. The underestimation of certain aspects of the dynamics of climatic characteristics of the regional climate in the context of global climate change has led to these aspects being still insufficiently studied today.

The purpose. This article aims (using the Odessa station as an example) to present the results of a physical-statistical approach to determining regional responses in the main indicators of the temperature regime of the North-Western Black Sea region to the changes occurring in the climate system of the present period.

Research methods. The implementation of the physical-statistical approach was conducted using classical methods of statistical and graphical analysis.

Presentation of the main research material. Based on long-term empirical data, it was determined that during the period from 2013 to 2023, compared to the standard climatic period (1961-1990), the average number of days with maximum air temperature above 0°C increased in all winter months. For the studied area, January remains the coldest winter month, with an average of 23,5 days with a minimum air temperature of 0°C or lower. The beginning of the 21st century is characterized by warmer winter conditions (compared to the period 1961-1990), which has led to a decrease in the number of days with low air temperature. Over the last eleven years (2013-2023), 65 thaw periods were registered. They most frequently occurred in January, in December and in February.

Research results and Practical value. The obtained results provide a basis for analyzing the dynamics of regional climate changes in the context of global climate change. The rational and timely application of the climate information presented in this article will contribute to the development of effective adaptation pathways, which, in turn, will make a significant contribution to ensuring the sustainable development of Ukraine. Future tasks will focus on researching the thermal regime indicators of other stations in the North-Western Black Sea region, involving additional empirical data.

Keywords: climate, thermal regime indicators, calendar season, long-term characteristics, temperature variability, thaw.

In cites: Prokofiev Oleg, Goncharova Liudmyla (2025). Analysis of the dynamics of the temperature regime of the North-Western Black Sea region in the context of global climate changes. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (62), 298-314. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-22>

Statement of the problem in a general form and its connection with important scientific and practical tasks. The processes taking place in the geographical environment are determined, first of all, by thermal conditions. Wide use of data on air temperature for scientific and practical purposes requires climatologists to study various indicators that allow to assess

the peculiarities of the temperature regime of any geographical region or individual point [1].

Climatological information is the basis for the formation of rational nature management, for solving natural and ecological problems, for perspective planning and placement of various branches of the economy [1, 2]. In recent decades, the study of the

climate of our planet and its variability has acquired clearly defined practical significance [3-7]. In this regard, the concept of implementation of state policy in the field of climate change for the period until 2030 [2] is aimed at developing a national climate program and preventing the reduction of risks associated with them.

According to domestic scientists [8-14], as a result of global warming, the climate on the territory of Ukraine will change dramatically, and therefore each new study in this direction will provide an opportunity to analyze climate-related natural resources in order to ensure the sustainable socio-economic development of our country.

The study of changes and fluctuations of the temperature regime as a whole, as well as its individual characteristics, in order to take them into account in the spheres of economic activity, and the development of perfect methods of its forecasting for various territories of Ukraine with great advance, are of great practical importance at the present time. Air temperature determines the state of many natural resources, which are a component of economic resources [1, 8, 9, 11, 14, 15]

Connection of the author's work with important scientific and practical tasks. The research was carried out in accordance with the goals formulated in the research works of the departments of the Faculty of Hydrometeorology and Ecology of the Odessa I.I. Mechnikov National University after on the topics: 'Forecasting dangerous meteorological phenomena over the southern regions of Ukraine' (No. DR 00115U006532); 'Complex method of probabilistic and prognostic modeling of extreme hydrological phenomena on the rivers of Southern Ukraine to ensure sustainable water use in conditions of climate change' (No. DR 0121U010964); 'Zoning the territory of Ukraine according to the degree of vulnerability to climate change and choosing optimal ways of adaptation'.

Analysis of recent research and publications.

Climatic changes occurring during the last decades cause concern of the scientific community. The researches of Ukrainian scientists point to the restructuring of climatic components that took place during the 20th century and continues in the 21st century [1, 9, 15-20]. The dynamics of the temperature-humidity regime and the assessment of its future changes and fluctuations under various climate scenarios for Ukraine are presented in works [1, 9, 11, 19]. The results of these studies indicate significant regional changes not only in time, but also in its spatial distribution. As is known, the formation of climatic fields occurs in close connection with the processes of circulation of air masses [1, 12, 13, 21-25]. The authors emphasize that on a global scale, the weakening of the zonal circulation and the growth of the meridional

southern component is noted in all seasons of the year [10, 14, 21]. The paper [13, 21], which presents the results of a statistical study of relationships in the climate system of the Atlantic-European region, is devoted to the circulation aspects of the spatio-temporal distribution of the thermal regime for the Eastern European region in the main and transitional seasons of the year.

As you know, climatic factors are of decisive importance, in particular, in the formation of the hydro-ecological state of water resources. Overall, warming has intensified the global hydrologic cycle by increasing globally averaged precipitation, evaporation, and runoff. Moreover, the consequences of global warming are not only changes in average values, but also a general increase in extremes. During the last thirty years, extreme events have taken place in Ukraine, primarily related to the rainfall regime. For example, in some regions, the number of abnormally dry years, winters, and summers significantly increased, and the change in the temperature regime was reflected only in the increased number of abnormally hot summers. Such changes led to the fact that, for example, during the years 1998-2007, droughts were observed almost every year in some regions of Ukraine [26]. In connection with the expected increase in air temperature in the Northern Hemisphere, the food security of Ukraine (and especially its southern regions) will depend on how effectively agriculture adapts to climate changes [1, 9].

Taking into account that the results of the research of many scientists [16-18, 22, 25, 27] indicate particularly significant climate changes over the last decades in the temperate latitudes of the Northern Hemisphere, the authors [13] investigated the current dynamics of the temperature regime of the Eastern European region in the sector 40-60°N. and 20-44° east. Based on the reanalysis of «ERA-INTERIM» data for the period 1979-2013 average monthly values of surface air temperature and atmospheric pressure in 144 nodes of a regular grid of points 2°×2° were analyzed. A comparison of multi-year air temperature regimes in January and July for different averaging periods shows that the contribution of temperature changes in these months to climate continentality changes in different parts of the sector is ambiguous.

Analysis of the dynamics of the temperature regime during the winter season allows us to state that the air temperature near the surface of the earth in almost the entire territory increased by 1°C on average. In the summer season, the average monthly air temperature in most of the territory increased (compared to the long-term average value) and the highest temperature anomalies were observed in the period 2001-2010 (up to 2 °C). Analysis of the dynamics of the temperature regime in the transitional seasons of the

year also indicates an increase in air temperature near the surface of the earth in the studied region [13].

As is known, the climate is formed under the influence of closely related factors, which have their own characteristics in each specific region of Ukraine. First of all, it is solar radiation, the nature of the underlying surface and atmospheric circulation. The interaction of these factors, their intensity and specific effects are characterized by a certain territorial individuality. In turn, each of the listed factors is formed under the influence of elements that also have their own individual geographical features [1].

The study of changes and fluctuations in the distribution of temperature characteristics and in the regime of precipitation (because they are one of the main indicators of the state of the climate system) for the purpose of taking into account in the spheres of economic activity, the development of perfect methods of their forecasting for various territories of Ukraine with great advance, have at the present time extremely important value [1, 11, 12, 16-19, 24].

The peculiarities of atmospheric circulation, the influence of the Black and Azov seas separate the south of Ukraine according to climatic characteristics into a separate area that requires research of its climate-related natural resources. Due to its geographical location and the state of the environment, the south of Ukraine is the territory for which the socio-economic consequences of climate change may be irreversible. Therefore, the scientific community is faced with the task of studying the reasons that lead to these changes, in order to predict the future state of the physical parameters of the most mobile links of the climate system.

For the territory of the Odesa region, a number of works [15, 20, 25, 27] were devoted to the study of the spatio-temporal dynamics of long-term indicators of the temperature and humidity regime. Based on a comparison of climate characteristics calculated for different averaging periods, the authors obtained results indicating regional scale variations, which are particularly noticeable at the current stage of global climate change.

Thus, as evidenced by the results of the above publications, it is extremely important to study the quantitative indicators of natural factors that influence the formation of the climate, which will allow predicting their future changes, and this, in turn, will help to timely assess meteorological and environmental risks in solving social problems, in order to ensure sustainable development of our country and especially its southern regions.

Highlighting previously unsolved parts of the general problem, to which the specified article is devoted. Now the issues of further socio-economic development of the state caused by changes in the earth's climate system are extremely urgent for

Ukraine. Due to its geographical location and the state of the environment, the south of Ukraine is the territory for which the socio-economic consequences of climate change may be irreversible. It should be taken into account that global warming has sharply expressed regional features, namely – for some regions it brings favorable changes, for others – these changes are negative and can lead to economic losses in various sectors of the economy and aggravation of ecological tensions [1, 26].

In order to solve natural and ecological problems, prospective planning and adaptation of various branches of the economy of the southern region, in connection with global climate changes, a resource approach to the study of such changes is important. For this, further comprehensive research of hydrometeorological processes, increase of the information base using modern methods is necessary physical and statistical analysis [28]. Agriculture, fuel and energy, water and other sectors of the economy, health and tourism are related to the state of the natural environment. The temperature regime is changing: spatial and temporal distribution. Therefore, the use of climate resource - information about the atmosphere, its thermal state can be taken into account to solve specific socio-economic problems.

The purpose of this article, using the example of the Odesa station, is to present the results of a statistical approach to the determination of regional responses in the main indicators of the temperature regime of the North-Western Black Sea region to those changes that occurred in the climate system during the period of the second global warming, which began in the 70s x years of the last century and continues to the present time.

In accordance with the stated objective, the study includes the following tasks, the resolution of which will allow for determining the dynamics of specific temperature indicators in the North-western Black Sea region: analysing the average daily, maximum, and minimum air temperatures for the period 1991-2023, as well as inter-daily variability and the diurnal aperiodic amplitude of air temperature; determining the number of days and the duration of periods with low air temperatures (-10.0°C and below). Identifying the number of days and the duration of thaw periods.

The subject of the study is the database of empirical data on the average daily, maximum and minimum air temperature at St. Odesa for 2790 winter calendar days of the period 1991-2023 [29]. *The main task* is to determine regional temperature changes in the North-Western Black Sea region during the last decade of the 20th century and two decades of the 21st century and to determine trends in temperature indicators of the modern period, compared to the climatic norm of 1961-1990 [30]. The period of rese-

arch of the thermal regime of the North-Western Black Sea Coast, the results of which are presented in this article, falls on the secondary global warming (the end of the 70s of the 20th century to the present), during which there is an intense global temperature increase, compared to the climatic norm of 1961-1990. The period of research of the thermal regime of the North-Western Black Sea Coast, the results of which are presented in this article, falls on the secondary global warming (the end of the 70s of the 20th century to the present), during which there is an intense global temperature increase.

Presentation of the main material of the study with a full justification of the obtained scientific results. As the data of meteorological observations show, in the last decades of the 20th and at the beginning of the 21st centuries, significant drops in the average daily air temperature became more frequent in

Ukraine, the repeated occurrence of which during the month is almost always accompanied by dangerous and spontaneous meteorological phenomena, which requires the scientific community to study and forecast them.

In accordance with the set goal, the study covers the last three decades, which are characterized by intense global warming. In order to determine the climatic responses in the North-Western Black Sea region, at the first stage, a study of **long-term changes in the average daily air temperature** was carried out, which reflects the peculiarities of the temporal distribution of air temperature in more detail than the monthly average. Using the series of observations of this meteorological quantity in the period 1991-2023 [29], its long-term average values were calculated and the largest and smallest of them were determined, which are listed in the table 1.

Table 1

Long-term values of average daily air temperature at St. Odesa in three periods
(I – 1991-2000; II – 2001-2010; III – 2013-2023)

Month	Average daily temperature, °C						Average monthly, °C		
	minimal			maximum					
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
<i>December</i>	-9,0	-6,4	-3,8	8,5	9,0	9,3	0,6	1,6	2,9
<i>January</i>	-9,0	-11,0	-9,5	4,5	7,3	7,1	-1,1	-0,2	-0,2
<i>February</i>	-7,5	-6,9	-5,3	6,4	7,2	8,5	0,2	0,3	2,1

As can be seen from the table 1, the range of values of the average daily air temperature has wide limits, but *in December* from the first (1991-2000) to the following periods under consideration, the temperature background is smoothed out, that is, the difference between its smallest and largest values decreases: from 17,5°C (I period) to 15,4°C (II period) and further up to 13,1°C (III period). For *January* and *February*, a similar trend (namely, a decrease in amplitude) is characteristic only for the period 2001-2023: *in January* – from 18,3 to 16,6°C and *in February* – from 14,1 to 13,8°C; from 1991-2000 by 2001-2010, on the contrary, the amplitudes increase – from 13,5 to 18,3°C *in January* and from 13,9 to 14,1°C *in February*.

Thus, it can be stated that the end of the 20th century was characterized by greater differences in the average daily air temperature in the study area than the beginning of the 21st. We also observe large differences between the given values and the average monthly air temperature.

At the next stage, the **dynamics of the number of days with average daily air temperature in different gradations** in the period 1991-2023 were ana-

lyzed. First, the total number of days for certain gradations of air temperature in the period 1991-2023 was determined. For this purpose, the following periods were analyzed: 903 (1991-2000), 935 (2001-2010) and 952 (2013-2023). The results of this stage are shown in table 2.

Analysis of the table 2 indicates that in the last decade of the 20th century and at the beginning of the 21st, *for all months of the winter season*, the average daily air temperature in the range of 0,1...5,0°C prevailed. *In December*, the number of days with an average daily air temperature of 0°C and below (from the previous to the following periods) decreased by 14,9%, *in January* – by 5,1%, and *in February* – almost twice (from 43,5% in the period 1991-2000 to 22,0% in 2013-2023). And, on the contrary, the number of days with an average air temperature above 0°C increases with each considered decade.

Thus, on St. Odesa, in the period 1991-2023, during which 2790 winter calendar days were analyzed, positive average daily air temperature was observed in 1673 of them and this is 60%. The most intensive growth of the indicator was registered in *February*, and the smallest – in *January*.

Table 2

The total number of days with average daily air temperature in different gradations at St. Odesa in three periods (I – 1991-2000; II – 2001-2010; III – 2013-2023)

<i>i</i>	Temperature, °C		<i>December</i>			<i>January</i>			<i>February</i>		
	from	to	I	II	III	I	II	III	I	II	III
1	-24,9	-20,0									
2	-19,9	-15,0				-	5	1			
3	-14,9	-10,0	8	4	-	10	9	12	5	11	1
4	-9,9	-5,0	40	29	8	44	47	45	25	32	21
5	-4,9	0,0	77	87	70	107	100	101	93	73	45
6	0,1	5,0	123	107	151	133	128	136	130	123	151
7	5,1	10,0	60	76	66	16	45	44	28	43	86
8	10,1	15,0	2	7	12				2	-	1
0°C and below			125	120	78	161	168	159	123	116	67
Above 0°C			185	190	229	149	173	181	160	168	238
<i>Indicator in percentage</i>											
0°C and below			40,3	38,7	25,4	51,9	49,3	46,8	43,5	40,8	22,0
Above 0°C			59,7	61,3	74,6	48,1	50,7	53,2	56,5	59,2	78,0

To study the dynamics of the average absolute frequency in the period 1961-2023, in the table 3 are determined for three time periods of the recurrence of the average daily air temperature according to the data of meteorological observations: the period of the last decade of the 20th century, two periods of the 21st century. They include data from the Climatic Ca-

dastre of Ukraine for the period 1961-1990 [30].

In January in the period 1991-2023 temperature in the range from -24,9 to -20,0°C was not observed, although in the period 1895-1975 such a value (according to the well-known monograph [31]) was recorded on average once every 10 years. The daily temperature ranged from -19,9 to -15,0°C in the period

Table 3

The average number of days with average daily air temperature in different gradations at St. Odesa in four periods (I – 1961-1990; II – 1991-2000; III – 2001-2010; IV – 2013-2023)

<i>i</i>	Temperature, °C		Month											
			<i>December</i>				<i>January</i>				<i>February</i>			
	from	to	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
1	-24,9	-20,0												
2	-19,9	-15,0	0,02				0,4	-	0,5	0,09	0,1			
3	-14,9	-10,0	0,3	0,8	0,4		2,1	1,0	0,9	1,1	0,9	0,5	1,1	0,09
4	-9,9	-5,0	2,3	4,0	2,9	0,8	5,1	4,4	4,7	4,1	3,7	2,5	3,2	1,9
5	-4,9	0,0	8,5	7,7	8,7	7,0	9,4	10,7	10,0	9,2	10,9	9,3	7,3	4,1
6	0,1	5,0	13,6	12,3	10,7	15,1	12,0	13,1	12,8	12,4	10,5	13,0	12,3	13,7
7	5,1	10,0	6,0	6,0	7,6	6,6	2,0	1,6	4,5	4,0	1,7	2,8	4,3	7,8
8	10,1	15,0	0,3	0,2	0,7	1,2				0,09	0,2	0,2	0,1	0,09

1991-2000 not registered, but already in 2001-2010 was observed 5 times in 10 years or 1 time in 2 years, which coincides with the period 1895-1975 [31]. In the years 2013-2023, the daily *January* temperature in this gradation was observed on average only 9 times in 100 years. *In the central month of winter*, the daily air temperature ranging from $-14,9$ to $-10,0^{\circ}\text{C}$ has been observed at the station since 1961, Odesa already almost every year with a decrease in the number of days on average by two times, compared to the norm. The dynamics of the number of days with a daily air temperature in the range from $-9,9$ to $-5,0^{\circ}\text{C}$ tends to decrease: from 5,1 days of the period 1961-1990 to 4,1 for the period 2013-2023.

In February at the beginning of the 21st century, the probability of a daily air temperature ranging from $-9,9$ to $-5,0^{\circ}\text{C}$ decreases on average, since in the second half of the 20th century it was 3-4 times annually, and now it is 2-3. *A similar trend in December* (table 3).

In winter at St. Odesa was dominated by daily air temperature from $0,1$ to $5,0^{\circ}\text{C}$ in almost all periods under consideration, with a slight difference *in February* in the period 1961-1990, in which the maximum falls on the limit of $-4,9$ to $0,0^{\circ}\text{C}$ – 10,9 days. *In the first and last months of the winter season* in the period 2013-2023 (compared to the previous decade) the number of days with a daily temperature ranging from $0,1$ to $5,0^{\circ}\text{C}$ increased significantly – by 1,4 days *in February* and by 4,4 days *in December*.

In addition, the analysis of table 3 allows us to state that on Art. Odesa *in December* from 1961 to the present (26-29 days) and *in February* in the period 1991-2023 (24-26 days) annual daily air temperatures in the range from $-4,9^{\circ}\text{C}$ to $10,0^{\circ}\text{C}$ were observed; *in January* 1961-2023 and in February (1961-

1990), the number of days with a daily air temperature ranging from $-9,9^{\circ}\text{C}$ to $5,0^{\circ}\text{C}$ prevailed – 26-28 and 25-26 days, respectively, in the above periods.

In general, the repeatability of average daily air temperature in higher temperature ranges, which indicates warmer winters, compared to the first half of the 20th century, has increased in the study region.

Average inter-day variability of air temperature. As stated in the fundamental monograph [1], an important indicator of the thermal regime of a certain territory (point) is the inter-day variability of air temperature. It reflects air temperature fluctuations caused by advection of heat or cold. Due to the fact that in the cold period of the year circulation processes play a significant role, the inter-day variability in winter in Ukraine is characterized by the largest values [1]. For the south of Ukraine, using data of 2790 days about the average daily air temperature at St. Odesa for three periods: one of the 20th (1991-2000) and two periods of the 21st (2001-2010 and 2013-2023) centuries, calculated multi-year average daily air temperatures for each day of a specific month of the winter season.

For clarity, on the basis of the obtained indicators, graphs of inter-day variability of air temperature and marked climatic norms (1961-1990) of average monthly air temperatures were constructed (fig. 1-3).

As can be seen from fig. 1, *in December* of the period 2013-2023 an excess of the daily air temperature in accordance with the climatic norm is clearly visible. In the period 1991-2010 inter-day variability has a more unstable thermal regime – in the first decade of the month (2001-2010), the temperature exceeds the climatic norm by $0,2$ – $3,8^{\circ}\text{C}$ (the norm is $1,4^{\circ}\text{C}$); the second and almost the entire third decades are characterized by temperatures that are already lo-

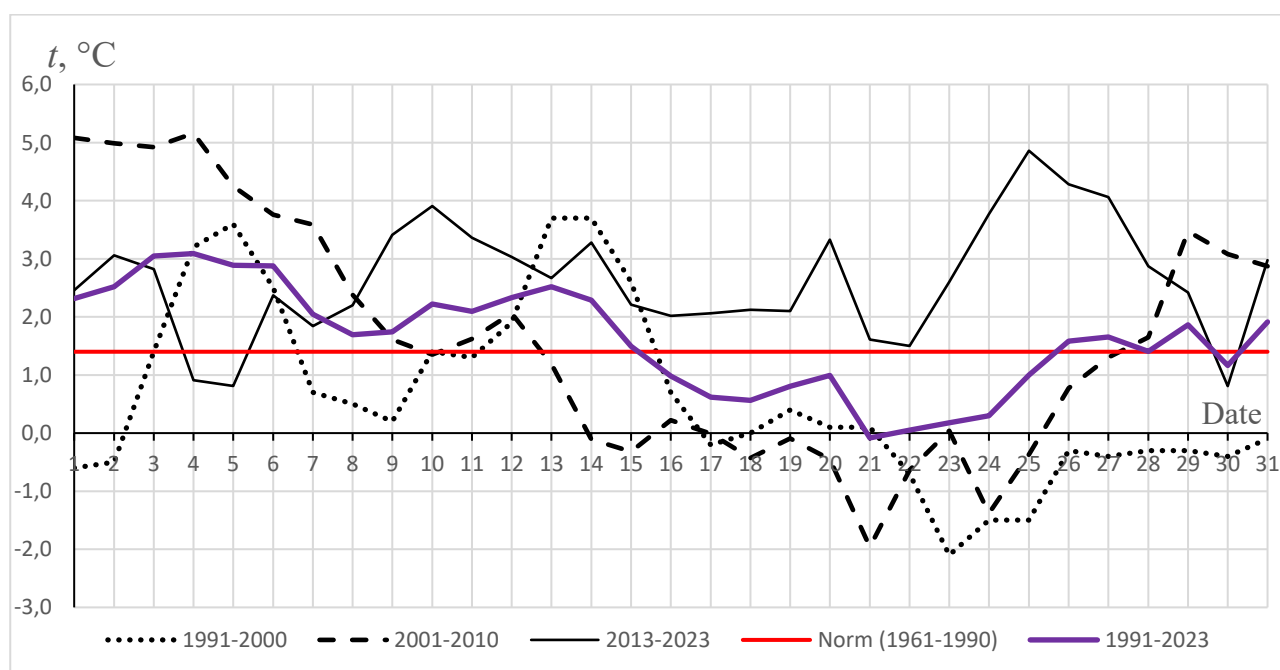


Fig. 1. Inter-day variability of air temperature (Odesa station, December)

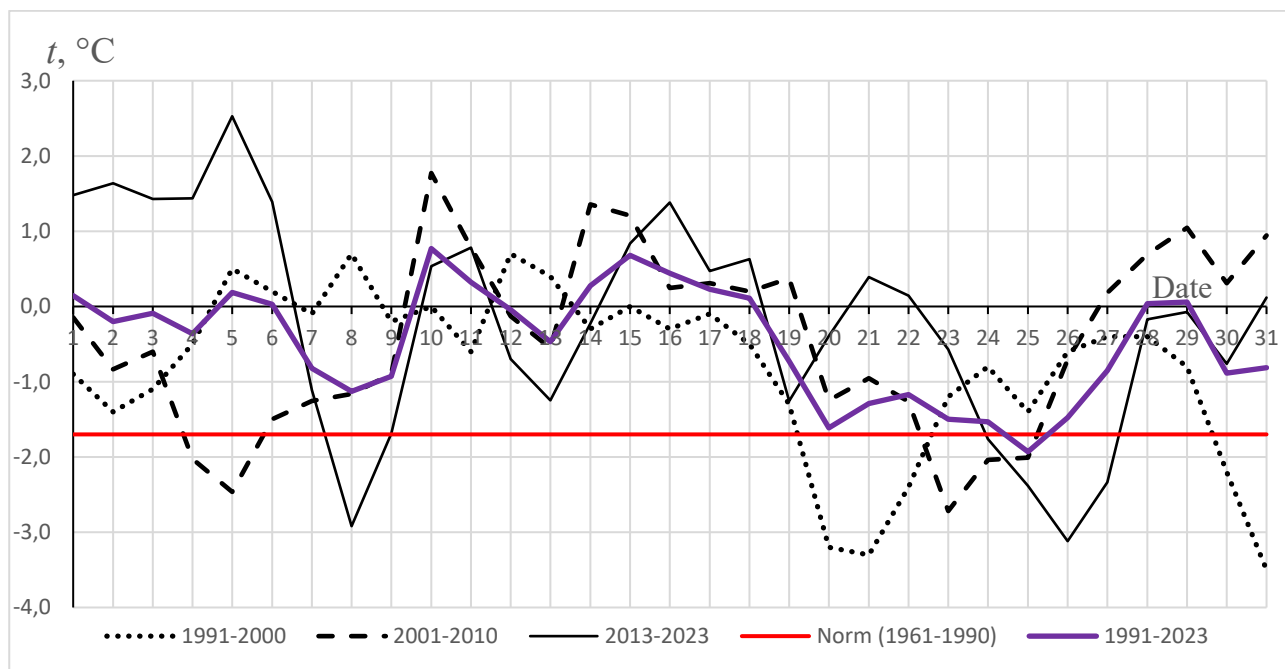


Fig. 2. Inter-day variability of air temperature (Odesa station, January)

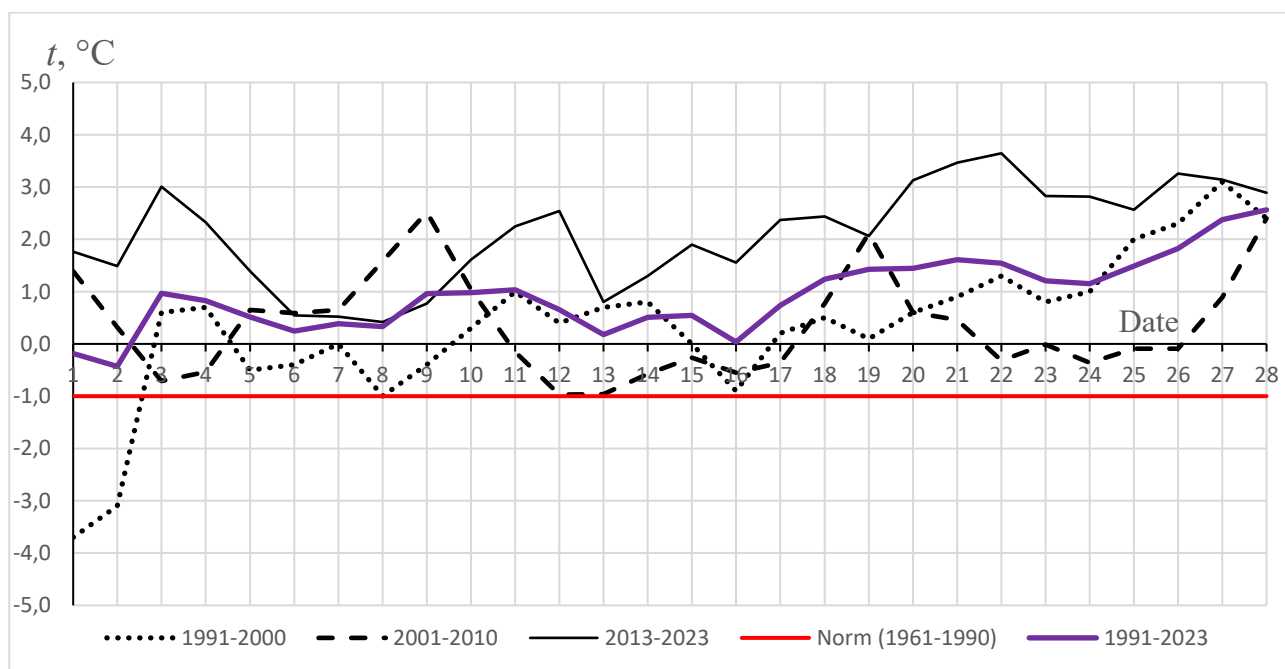


Fig. 3. Inter-day variability of air temperature (Odesa station, February)

wer than the norm by 0,1-3,4°C.

Analysis of fig. 1-3 allows us to state that only *in January*, from the first to the following decades, a similar trend in changes in the average inter-day variability of air temperature is observed. Multi-year daily amplitude *in December* of the period 1991-2000 is 5,8°C; period 2001-2010 – 7,2°C and 2013-2023 – 4,1°C. *In January*, from the 1st to the 3rd period, the indicator increases from 4,2°C to 5,6°C; *in February*, the inter-day variability of air temperature from 1991 to 2023 stabilizes, as the long-term average daily amplitude decreases – in the period 1991-2000 it is equal to 6,8°C; in the next decade – 4,2°C

and in the period 2013-2023 is already 3,2°C. As the authors of the monograph [1] emphasize, this indicator is 2,2-2,6°C on average in winter in Ukraine.

In addition, as can be seen from Figures 1-3, *in January* and *February* for the last multi-year period (1991-2023), daily air temperatures significantly exceed the climatic norm. And only *in December* (on average) does the temperature correspond to the climatic norm of 1961-1990.

Thus, *in winter*, the inter-day variability in the study area, which reflects air temperature fluctuations caused by advection of heat or cold, and which, in turn, is related to atmospheric circulation, indicates

a large spread of indicator values and depends on the month of the season. In our opinion, this is related to changes in circulation processes in the Northern Hemisphere, which were recorded at the end of the 20th and the beginning of the 21st centuries [21, 32], which is a response in the North-Western Black Sea region.

In addition to the considered indicators, important characteristics of the temperature regime of a certain territory (point) are the maximum, average maximum, absolute maximum and minimum, average minimum, absolute minimum air temperature. Below are the results of the study of the maximum and minimum air temperature, which were analyzed for the period 2013-2023 at St. Odesa.

In order to determine the dynamics of the extreme temperature indicators of the modern period, they were subsequently compared with the climatic norm (1961-1990).

Indicators of the maximum air temperature at St. Odesa in the period 1961-2023. The average maximum air temperature characterizes the warmest part of the day.

In the table 4 shows the average, the average of the absolute maxima of air temperature determined for the period 2013-2023. The listed indicators of the standard period (1961-1990) and the average monthly air temperature are given. The average maximum air temperature of each month was calculated as the arithmetic mean of the maximum thermometer. The average of the absolute maxima of air tempera-

ture was defined as the arithmetic mean of the maximum values recorded in each month of the analyzed period. The absolute maximum air temperature is not given, as it requires an increase in the volume of empirical data for analysis. But *in December and January*, it exceeded the value of the period 1961-1990, and *in February*, on the contrary, its decrease was recorded.

As can be seen from the table 4, the average and the average of the absolute maxima of the air temperature in the last period under consideration exceeded the climatic norm in all months of the winter season, but the most *in February*: the average by 3,8°C and the average of the absolute by 5,2°C.

Analysis of data on the maximum air temperature at St. Odesa showed that the maximum air temperature was above 0°C *in December* on 276 days out of 307, which is 89,9%; *in January* – 256 days out of 340, which is the least number of days among the winter months – 75,3%; *in February*, this indicator is 269 days out of 305 (88,2%).

In general, for the *winter season* of the period 2013-2023 out of 952 days, 801 days recorded the maximum air temperature above 0°C, which is 84,1%.

In the table 5 shows the average and largest number of days with a maximum air temperature above 0°C for two periods.

As can be seen from the table 5, in the period 2013-2023, compared to the standard climatic period (1961-1990), the average number of days with a max-

Table 4

Maximum air temperature (°C) at St. Odesa for two periods: I – 2013-2023; II – 1961-1990

Characteristic	December		January		February	
	I	II	I	II	I	II
Average	5,9	4,0	3,0	1,1	5,6	1,8
The average of the absolute	12,9	11,3	11,5	9,4	15,0	9,8
Average monthly	2,9	1,4	-0,2	-1,7	2,1	-1,0

Table 5

Number of days with maximum air temperature above 0°C on St. Odesa in two periods: I – 2013-2023; II – 1961-1990

Period, years	December		January		February	
	average	most	average	most	average	most
2013-2023	27,6	31 2017, 2019, 2023	23,3	30 2020	24,5	29 2016, 28 2013
1961-1990	26,0	31 1974	19,3	29 1975, 1989	18,1	28 1989, 1990

imum air temperature above 0°C increased in all winter months: *in December* – by 1,6 days, *in January* – by 4,0 days and *in February* – by 6,4 days.

At the next stage of the research, using a series of observations of the minimum air temperature at St. Odesa in the period 2013-2023, received and analyzed **indicators of the minimum air temperature**, which characterizes the coldest part of the day.

In the table 6 shows the average minimum and the average of the absolute minimum air temperatures. The listed indicators of the standard climatic

period (1961-1990) and the average monthly air temperature are given. The average minimum air temperature of each month was calculated as the arithmetic mean of the minimum thermometer. The average of the absolute minimum air temperatures was defined as the arithmetic average of the minimum values recorded in each month of the analyzed period. The absolute minimum air temperature is not given, as it requires an increase in the volume of empirical data for analysis.

As can be seen from the table 6, average mini-

Table 6

Minimum air temperature (°C) at St. Odesa for two periods: I - 2013-2023; II - 1961-1990

Characteristic	December		January		February	
	I	II	I	II	I	II
Average	-0,4	-1,1	-3,8	-4,2	-1,4	-3,2
The average of the absolute	-7,5	-9,8	-14,6	-13,2	-9,8	-11,1
Average monthly	2,9	1,4	-0,2	-1,7	2,1	-1,0

imum air temperature in the period 2013-2023 increased (compared to the climatic period) in all months of the winter calendar season: *in January* – by 0,4°C, *in December* – by 0,7°C, and most *in February* – by 1,8°C.

A similar trend is observed with the average of the absolute minimum air temperatures, but only *in December* and *February*. *In January*, on the contrary, the average of the absolute minimums decreased (compared to the climatic norm of 1961-1990) from -13,2°C to -14,6°C.

Absolute minima of air temperature, which were determined for the entire period of instrumental observations, in the period 2013-2023 were not surpassed: *in December*, -23,1°C (1902), *in January*, -28,3°C (1940) and *in February*, -29,0°C (1929) opinion, the absolute minimum air temperature of the 20th century is unlikely to be changed, taking into account the global warming of the climate, which began in the 70s of the last century.

Analysis of empirical data showed that the minimum air temperature was 0°C and below *in December* on 184 days out of 307, which is 59,9%; *in January* – 258 days out of 340, which is the largest number of days among the winter months – 75,9%; *in February*, this indicator is 195 days out of 305 (63,9%). In general, for the *winter season* of the period 2013-2023 out of 952 days, 637 recorded the minimum air temperature of 0°C and below, which is 66,9%.

The average and maximum number of days with a minimum air temperature of 0°C and below in the period 2013-2023 was also calculated; average: *in*

December it was 18,4, *in January* – 23,5, and *in February* – 17,7 days; the largest number of days: *in December* – 27,0 (2013), *in January* – 29,0 (2017) and *in February* – 24,0 (2017).

Thus, on St. Odesa and in the period 2013-2023, as well as in previous periods (according to research by Ukrainian scientists [1, 13]), *January remains the coldest winter month*, with an average of 23,5 days with a minimum air temperature of 0°C and lower.

During the winter season in Ukraine, conditions are often created for the formation of **low air temperatures (-10,0°C and below)**. Such a decrease in air temperature is considered a dangerous weather phenomenon [1, 32]. As emphasized in the fundamental monograph [1], the low air temperature is caused by the intrusion of continental arctic air, which spreads in anticyclones from the northeast, north, or northwest behind diving cyclones. Cold anticyclonic weather is established, during which the Arctic air undergoes additional radiation cooling, which leads to a significant decrease in air temperature (-35... -30°C). For southern regions up to -25°C.

A strong cooling of the air also occurs during the spread from the east of the spur of the Siberian anticyclone, which is intensified by anticyclones from the northwest or northeast. If the spur is oriented from the northeast, cold air can spread over the entire country. A decrease in air temperature also occurs in those cases when a high multicenter depression forms over the southeast of Eastern Europe and Western Siberia, behind which there is a significant advection of cold in the western and southern regions. Long-term maintenance of air temperature -10,0°C and below in

combination with atmospheric phenomena negatively affects the activity of many branches of the economy and, first of all, agricultural production. Such a decrease in air temperature causes the death of winter crops, fruit trees, and forest plantations. At an air temperature of $-25,0^{\circ}\text{C}$ and below, the parts of machines and mechanisms are destroyed, the operation of railway transport deteriorates [1].

An important characteristic thermal regime is **the duration of the period with low air temperature**, which can vary widely from month to month: from several hours to several days. The analysis of empirical data made it possible to analyze this indicator in the period 2013-2023. It turned out that at Art. Odesa in December, the longest duration of low air temperature was recorded for 3 days (21, 22, 23) and was observed in 2021 ($-10,0^{\circ}\text{C}$); in general, 9 days out of 307 days were registered, that were considered; in December 2015, 2017, 2019, 2020 and 2023, a temperature of $-10,0^{\circ}\text{C}$ and below was not registered at the station. In January, the years 2016 and 2021 were marked by particularly long periods with low temperatures (up to 7 days) ($-10,0^{\circ}\text{C}$... $-19,0^{\circ}\text{C}$). Of the 340 days of the 11-year period for the central month of the winter season, air temperatures of $-10,0^{\circ}\text{C}$ and

below were recorded in 54 days; January 2020 and 2023 were the warmest – no such temperatures were recorded.

Low temperatures in February 2013-2023 were observed on 18 days out of 305. Long periods with temperatures of $-10,0^{\circ}\text{C}$ and below were recorded in 2014 (6 days: 1.02-6.02); 3 days of January (29.01-31.01) are added to them. In 2018, 4 days (25.02-28.02) have been determined, followed by an extension in March, two more days (1.03-2.03). In February 2016, 2020, 2022 and 2023 low temperatures at Odesa is not recorded.

The authors V.M. Babichenko, S.F. Rudishina, N.V. Nikolaeva, L.M. Gushchyna [1] the emphasizes the significant interest of data on the repeatability of low air temperatures of -20 , -25 , -30°C and below. Such a temperature, although it does not last long, often causes significant damage to agriculture. Therefore, it was interesting to analyze the presence (absence) of such temperatures at St. Odesa in the period 2013-2023. In eleven years, only one case with a minimum temperature of -20°C and below -21°C was recorded (January 8, 2015).

Table 7 contains the average number of days with minimum air temperature in different gradations

Table 7

The average number of days with low air temperature in different gradations for two periods: I – 2013-2023; II – 1961-1990

Temperature, $^{\circ}\text{C}$	December		January		February	
	I	II	I	II	I	II
$\leq -10,0$	0,9	1,6	4,9	6,1	1,6	3,3
$\leq -15,0$		0,1	1,7	1,8	0,2	0,7
$\leq -20,0$			0,09	0,2		0,03
$\leq -25,0$				0,03		0,03

from 2013 to 2023. To determine the dynamics of this indicator in months of the winter calendar season, information of the standard climatic period is provided.

As can be seen from the table 7, on St. Odesa the number of days with a minimum air temperature of $-10,0^{\circ}\text{C}$ and below was reduced by half (compared to the climatic norm) in December. In the range of $-15,0^{\circ}\text{C}$ and below, not a single case was recorded in the eleven years of the period 2013-2023. January also became warmer (compared to the climatic norm). The number of days with a low air temperature of $-10,0^{\circ}\text{C}$ and below decreased from 6,1 (1961-1990) to 4,9 days (2013-2023). In the central month of the winter season, the minimum air temperature in the range of $-15,0^{\circ}\text{C}$ and below almost corresponds to the climatic norm, and in the range of $-20,0^{\circ}\text{C}$ and below, it has become a rare phenomenon, since the

average number of days in the period 2013-2023 is 0,09 (9 times in 100 years), compared to the period 1961-1990, in which such a temperature was observed once in five years with an indicator of 0,2.

The minimum air temperature of $-25,0^{\circ}\text{C}$ and below was not observed at all in the first period, while in the years 1961-1990 it was observed three times in 100 years. In the last month of the winter season, the number of days with a minimum air temperature of $-10,0^{\circ}\text{C}$ and below almost halved: from 3,3 (1961-1990) to 1,6 days (2013-2023); the number of days with an air temperature in the range of $-15,0^{\circ}\text{C}$ and below almost tripled: from 7 cases in every 10 years (1961-1990) to 1 case in every 5 years. On St. Odesa in the period 2013-2023 the minimum air temperature in the range of $-20,0^{\circ}\text{C}$ and below was not recorded in February.

Thus, the beginning of the 21st century is characterized by warmer winter conditions (compared to the period 1961-1990), which caused a decrease in the number of days with a low air temperature of $-10,0^{\circ}\text{C}$ and below.

Daily amplitude of air temperature in the winter season. The authors of the well-known monograph [1] emphasize that the amplitude of temperature fluctuation is one of the important indicators of air temperature. Amplitude information is important for many industries, especially construction, as a large amount of work is done outdoors. It is also necessary for agricultural production. Amplitude data is used in weather forecasting. For the territory of Ukraine, this issue has hardly been studied, despite its importance and relevance. Daily changes in air temperature depend on the nature of the weather. In winter, the largest daily amplitude is due to the movement of atmospheric fronts and a sharp change in air masses. The periodic daily amplitude is the difference between the warmest and coldest times.

In this article, aperiodic amplitudes are defined and analyzed. By definition [1]: 'It is the difference between the average maximum and average minimum temperature, which gives an idea of the average

daily amplitude and characterizes the instability of the weather of a given month'.

In the table 8 shows the average daily air temperature amplitude calculated for the period 2013-2023 and the amplitude of the standard climatic period, taken from the climatic Cadastre of Ukraine. As can be seen from the table 8, at the beginning of the 21st century on St. Odesa, during the winter calendar season, the daily amplitude decreases compared to the standard climatic period: *in December* and *January* – by $1,5-1,6^{\circ}\text{C}$, which is almost 30%, and the largest *in February* – by $2,0^{\circ}\text{C}$ and the growth of this daily air temperature index exceeds 40%.

In the table 9 shows the values of the absolute amplitude of the air temperature, calculated for each month of the winter season based on the values of daily maximums (according to the maximum thermometer) and daily minimums (according to the minimum thermometer) of the air temperature.

As can be seen from the table 9, *in the winter season* of the period 2013-2023 absolute monthly amplitude of air temperature at St. Odesa fluctuated between $22-26^{\circ}\text{C}$. *The highest* temperature was recorded *in January* ($26,2^{\circ}\text{C}$), and *the lowest in December* ($21,5^{\circ}\text{C}$).

Table 8

Average daily aperiodic amplitude of air temperature

Month	Daily temperature, $^{\circ}\text{C}$		Amplitude, $^{\circ}\text{C}$		Difference, $^{\circ}\text{C}$ (I – II)
	maximum	minimal	I 2013-2023	II 1961-1990	
<i>December</i>	5,9	-0,7	6,6	5,1	1,5
<i>January</i>	3,1	-3,8	6,9	5,3	1,6
<i>February</i>	5,6	-1,4	7,0	5,0	2,0

Table 9

Daily extremes ($t_{\max}$, $t_{\min}$) and absolute monthly amplitude (A) of air temperature, $^{\circ}\text{C}$

Year	<i>December</i>			<i>January</i>			<i>February</i>		
	$t_{\max}$	$t_{\min}$	A	$t_{\max}$	$t_{\min}$	A	$t_{\max}$	$t_{\min}$	A
2013	9,3	-9,0	18,3	13,0	-16,0	29,0	10,6	-5,0	15,6
2014	14,8	-11,0	25,8	13,4	-17,0	30,4	11,0	-14,0	25,0
2015	17,0	-8,0	25,0	9,0	-21,0	30,9	12,0	-10,0	22,0
2016	12,1	-11,0	23,1	9,8	-19,0	28,8	22,0	-5,0	27,0
2017	14,0	-5,0	19,0	5,6	-16,0	21,5	16,1	-11,0	27,1
2018	9,0	-14,0	23,0	11,7	-12,0	23,7	12,0	-17,0	29,0
2019	15,0	-8,0	23,0	9,8	-13,0	22,8	15,2	-10,0	25,2
2020	12,0	-4,0	16,0	12,0	-7,0	19,0	18,0	-8,0	26,0
2021	13,0	-10,0	23,0	13,0	-19,0	32,0	18,1	-14,0	32,1
2022	-	-	-	14,0	-18,0	32,0	14,0	-6,0	20,0
2023	15,9	-3,0	18,9	15,7	-3,0	18,7	15,6	-7,5	23,1
Average			21,5			26,2			24,7

The amplitude of the air temperature does not remain constant from year to year and undergoes fluctuations. The absolute amplitude of air temperature fluctuations (the difference between the absolute maximum and the absolute minimum) gives the greatest changes in air temperature in any part of Ukraine [1].

Thaw. A characteristic feature of the winter season in Southern Ukraine is frequent thaws. A day with a thaw is considered a day when the maximum air temperature above 0°C is observed against the background of constant negative air temperature [1].

Intense and prolonged thaws are considered a dangerous phenomenon. After low air temperature, they negatively affect the overwintering of winter crops, reduce their hardening, sharply increase the consumption of carbohydrates, cause the formation of an ice crust, water saturation of the upper soil horizon, which during the next decrease in air temperature can lead to freezing of winter crops. Intensive melting of snow leads to wetting and washing of winter crops. Freezing and thawing of various metal structures and building structures reduces their stability and prevents construction work. During a thaw, the walls of buildings get wet, and with the subsequent cooling, an ice crust forms on them, which leads to their collapse. Thaws hinder the movement of trucks and motor vehicles. Sometimes, during the thaw, the ice on the rivers breaks in the middle of winter and floods are noted. Frequent change of periods of thaws with frosts reduces the resistance of the human body, the number of cold diseases increases. Thaws are caused by the instability of the weather in the winter season, are most often found in the south of Ukraine [1]. Considering the conditions listed above, it was important to analyze this indicator of the thermal regime for the St. Odesa, which was carried out based on the data of the maximum air temperature in the months of the winter season for the period 2013-2023.

In the first month of the winter season, no thaws were observed in 2017, 2019, 2020 and 2023. In those years, the maximum air temperature at the station during the month was positive. Unfortunately, there are no data for 2022. *In December*, 15 periods with thaws were characterized by different duration and intensity. The longest duration was recorded in 2014 and 2021 – 20 days with temperatures from 1,2 to 14,8°C against the background of constant negative temperature according to the maximum thermometer in the range of 0,0 ... -3,9°C. The thaws of 2018 (duration of 16 days with temperatures of 0,2-9,0°C against the background of negative temperatures of -1,0 ... -2,9°C) and 2015, in which the duration of the thaw consisted of 18 days with temperatures of 1,7-17,0°C against the background of negative temperatures of -1,0... -3,5°C. The thaw in 2013

lasted 19 days with temperatures in the range of 2,0-9,3°C against the background of much lower negative temperatures (0,0... -1,0°C).

In January, 340 days (2013-2023) with maximum air temperature were analyzed and 32 periods with thaws were determined, which amounted to 226 days in eleven years. Thaws *in January* (as well as *in December* and *February*) were characterized by different duration and intensity. The longest duration was recorded in 2014 and 2015 – 21 and 22 days, respectively. The thaw in 2014 was characterized by maximum air temperatures of 0,2-13,4°C against a background of constant negative temperature within the range of 0,0...-8,2°C. Another thaw this year lasted only 2 days with temperatures of 1,0°C, but against the background of already lower temperatures (-5,0... -11,0°C).

The 2015 thaw, which lasted 22 days, was characterized by positive temperatures from 2,0°C to 9,0°C against the background of negative temperatures -1,0... -11,8°C.

The thaws of 2013 (three periods lasting 12, 6, and 2 days), 2016 (three periods lasting 13, 5 and 1 day), 2017 (four periods lasting 5, 4, 4 and 1 day), 2018 (three periods), 2019 (five periods – 9, 6, 4, 3 and 2 days of different intensity), 2021 (12, 12 and 2 days) and 2022 (10, 10 and 5 days), in which three periods and the year 2023 (11, 10, 2 and 2 days) are registered. And only in 2020, no negative air temperatures were registered, but only positive ones – in the range of 1,0-12,0°C.

In the last month of the winter season, 18 periods (160 days) with thaw were recorded, which accounted for 30% of the total number of days with thaw. In 2013, 2016, 2020 and 2022, only positive temperatures were observed and, thus, thaws were not recorded. Prolonged thaws were registered in 2014 (one period of 24 days with temperatures of 1,0-11,0°C against the background of negative air temperatures in the range of -2,0...-7,0°C); a similar picture was observed in 2023 (21 days), 2019 (22 days), 2018 (23 days); 2015 and 2021 turned out to be more unstable, with frequent thaws of varying duration and intensity.

It turned out that in the past eleven years, 65 thaw periods were registered, which totaled 539 days per season. *Most often* (42% of the total number of days), they were repeated *in January* – 32 cases; *in December* there were 15 (28%) of such cases, and *in February* – 18 (30%).

As stated in the monograph 'Climate of Ukraine' [1]: 'Thaws significantly affect the regime of snow cover. The greater the repeatability of thaws, the less likely it is to form a stable snow cover. Years with frequent and long thaws are characterized by a small number of days with snow cover and its low altitude, and sometimes even a complete absence of snow

cover. Thaw lasting more than 10 days almost always leads to snow cover of any height. In winter, when thaws are rarely observed, the snow cover is always stable'. Therefore, information about thaws is very important for the North-Western Black Sea region, which is the leading highly developed industrial and agricultural region of Ukraine.

Conclusions:

1. An analysis of empirical data from 1991 to 2023 indicates that the late 20th century was characterized by greater fluctuations in the average daily air temperature in the study area compared to the early 21st century. During this period, 60% of the days exhibited positive temperature values, predominantly ranging from 0.1°C to 5.0°C. The most significant increase in temperature was recorded in February, while the least pronounced change was observed in January. Overall, the study region has experienced an increased frequency of average daily air temperatures within higher temperature ranges, indicating milder winters compared to the first half of the 20th century.

2. The inter-daily variability of air temperature at the St. Odesa exhibits significant fluctuations and depends on the month of the winter season. In our view, this variability is associated with changes in atmospheric circulation processes in the Northern Hemisphere, which were observed at the end of the 20th and the beginning of the 21st century, and have consequently influenced the climate dynamics in the North-western Black Sea region.

3. The average and the mean of absolute maximum air temperatures during the period 2013–2023 exceeded the climatic norm for all months of the winter season, with the most significant deviations recorded in February: the mean temperature was higher by 3.8°C, and the mean of absolute maximums exceeded the norm by 5.2°C. In 84.1% of cases, the maximum daily temperature was above 0°C. The average number of days with a maximum temperature above 0°C increased compared to the climatic norm: by 1.6 days in December, 4.0 days in January, and 6.4 days in February.

4. The average minimum air temperature during the period 2013–2023 exceeded the climatic norm, increasing by 0.4°C in January, 0.7°C in December, and reaching the highest deviation of 1.8°C in February. A similar trend was observed in the mean of absolute minimum air temperatures, but only in December and February; in January, however, this indicator fell below the climatic norm of 1961–1990 by 1.4°C, from -13.2°C to -14.6°C. During the study period, the number of days with a minimum air temperature of 0°C or lower accounted for 66.9%. At the Odesa station, January remained the coldest winter month between 1991 and 2023, with an average of 23.5 days per year registering minimum temperatures of 0°C or below.

5. The average number of days with a minimum air temperature of -10.0°C or lower has significantly decreased over the past eleven years across all winter months (compared to the climatic norm). This reduction is most pronounced in December and February, where the frequency has halved – from 1.6 to 0.8 days and from 3.3 to 1.6 days, respectively. In January, the decrease was from 6.1 to 4.9 days. For temperatures of -15.0°C or lower during 2013–2023, no occurrences were recorded in December (compared to a norm of once per decade). In January, the frequency remained close to the climatic norm, with an average of 1.7 days (compared to the norm of 1.8). In February, temperatures of -15.0°C or lower were observed twice in ten years, whereas the historical norm is seven times per decade. Minimum temperatures of -20.0°C or lower have become increasingly rare. In December, such temperatures have not been recorded for the entire observational period (1961–2023). In January, only one occurrence of -20°C or lower (-21.0°C, recorded on January 8, 2015) was documented, compared to the norm of once every five years. In February, no cases were observed, whereas the historical norm was three occurrences per century. Extremely low temperatures of -25.0°C or lower have not been recorded in the 21st century, while during 1961–1990, such temperatures occurred three times per century in January and February. These findings indicate that the early 21st century is characterized by significantly milder winter conditions compared to the 1961–1990 period, as evidenced by the reduced number of days with extremely low air temperatures.

6. At the beginning of the 21st century, the daily aperiodic amplitude of air temperature at the Odesa station during the winter season has decreased compared to the standard climatic period. In December and January, the reduction amounts to 1.5–1.6°C, which corresponds to nearly 30%, while the most significant decrease is observed in February – by 2.0°C – where the decline exceeds 40%.

7. Over the eleven years of the 21st century, 65 thaw periods have been recorded, totalling 539 days. These periods occurred most frequently in January, accounting for 32 cases (42% of the total thaw days). In December, 15 cases (28%) were documented, while in February, 18 cases (30%) were recorded.

8. The obtained results may serve as a foundation for analysing the dynamics of regional climate change in the context of global climate transformations. The rational and timely application of the climatic information presented in this study will contribute to the development of effective adaptation strategies, which, in turn, will significantly support the sustainable development of the country. Future research will focus on studying the thermal regime indicators of other southern regions of Ukraine.

Bibliography

1. Ліпінський, В. М., Дячук, В. А., & Бабіченко, В. М. (Ред.). (2003). Клімат України: монографія. Київ: Видавництво Раєвського.
2. Кабінет Міністрів України. (2024, 30 травня). Про схвалення Стратегії формування та реалізації державної політики у сфері зміни клімату на період до 2035 року і затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2024-2026 роках (№ 483-р). <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-skhvalennia-stratehii-formuvannia-ta-realizatsii-derzhavnoi-polityky-u-sferi-zminy-klimatu-na-period-t300524>
3. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
4. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). Climate Change Information for Regional Impact and for Risk Assessment. In Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 1767-1926). chapter, Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.014>
5. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
6. IPCC. (2023). Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Core Writing Team, H. Lee ma J. Romero, red., c. 35-115). IPCC. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
7. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). Europe. In Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (1817-1928). chapter, Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.015>
8. Balabukh, V., та ін. (2018). Extreme weather events in Ukraine: Occurrence and changes. P. J. Sallis (Ред.), Extreme weather (с. 85-106). London: Intech Open.
9. Степаненко, С. М., & Польовий, А. М. (Ред.). (2018). Кліматичні ризики функціонування галузей економіки України в умовах зміни клімату: монографія. Одеса: Державний екологічний університет.
10. Reshetchenko, S. I., Dmitriyev, S. S., Cherkashyna, N. I., & Goncharova, L. D. (2020). Climate indicators of changes in hydrological characteristics (a case of the Psyol river basin). Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (53), 155-168. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-53-12>
11. Замфірова, М. С., & Хохлов, В. М. (2020). Режим температури повітря та опадів в Україні в 2021–2050 роках за даними ансамблю моделей CORDEX. Український гідрометеорологічний журнал, (25), 17-27. <https://doi.org/10.31481/uhmj.25.2020.02>
12. Гончарова, Л., Прокоф'єв, О., & Решетченко, С. (2022). Особливості клімато-географічного розподілу атмосферних опадів на півдні України. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (57), 81-94. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-07>
13. Гончарова, Л. Д., та ін. (2017). Сучасна динаміка температурного режиму Східно-Європейського регіону в основні та перехідні сезони року. I Всеукраїнський гідрометеорологічний з'їзд з міжнародною участю: Матеріали з'їзду. Одеса: ТЕС.
14. Borovska, H., & Khokhlov, V. (2023). Climate data for Odesa, Ukraine in 2021-2050 based on EURO-CORDEX simulations. Geoscience Data Journal. <https://doi.org/10.1002/gdj3.197>
15. Волошина, Ж. В. (Ред.). (2010). Кліматичні ресурси Одеської області для сталого розвитку: науково-практичний довідник. Одеса: Державна гідрометслужба України.
16. Гелевера, О., Мостіпан, М., & Топольний, С. (2023). Багаторічна динаміка температури повітря зимового та весняного сезонів у 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>
17. Пясецька, С., & Щеглов, О. (2023). Сучасний характер змін середньої місячної температури повітря протягом 2006-2020 рр. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (58), 217-230. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-17>
18. Барабаш, М. Б., & Татарчук, О. Г. (2009). Практичний напрям досліджень зміни клімату в Україні. Наукові праці УкрНДГМІ, (57), 28-36.
19. Хоменко, І. А., та ін. (2024). Районування території України за ступенем вразливості до зміни клімату та вибір оптимальних шляхів адаптації. 79-та звітна наукова конференція професорсько-викладацького складу і наукових працівників факультету гідрометеорології і екології ОНУ ім. І. І. Мечникова: Матеріали конференції. Одеса: Одеський національний університет ім. І. І. Мечникова.
20. Iyus, G. P., Goncharova, L. D., Kosolapova, N. I., & Zubkovych, C. O. (2018). Modern seasonal features of the risk mode on the territory of Odesa region. Review Scientific Journal (Science), 1(3[10]), 27-33.
21. Гончарова, Л. Д. (2014). Повітряні течії тропосфери та стратосфери північної півкулі: монографія. Одеса: ТЕС.

22. Гончарова, Л. Д., Прокоф'єв, О. М., Решетченко, С. І., & Черниченко, А. В. (2021). Вплив атмосферних макропроцесів на просторовий розподіл опадів по території України у весняний сезон. *Український гідрометорологічний журнал*, (27), 5-15. <https://doi.org/10.31481/uhmj.27.2021.01>
23. Гончарова, Л. Д., & Прокоф'єв, О. М. (2021). Клімато-географічні особливості розподілу опадів на території України в осінній період. *Екологічні науки*, 2(35), 94-98. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.2-35.16>
24. Гончарова, Л. Д., & Косолапова, Н. І. (2017). Вплив основних телеконекцій Північної півкулі на режим опадів по території України. *Вісник Одеського національного університету. Серія «Географічні та геологічні науки»*, 1(30), 11-27.
25. Прокоф'єв, О. М., & Гончарова, Л. Д. (2021). Статистичні характеристики добових сум атмосферних опадів на території Одеської області в умовах змін глобального клімату. *Вісник Одеського національного університету. Серія «Географічні та геологічні науки»*, 1(38), 67-80. [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2021.1\(38\).234679](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2021.1(38).234679)
26. Ліпінський В. М., Осадчий В. І., Бабіченко В. М. (Ред.) (2006). *Стихійні метеорологічні явища на території України за останнє двадцятиріччя (1986-2005 рр.): монографія*. Київ: [б. в.].
27. Гончарова, Л. Д., & Прокоф'єв, О. М. (2024). *Динаміка окремих показників атмосферних опадів Півдня України у період 1961-2020 роки: монографія*. Одеса: Одеський державний екологічний університет.
28. Гончарова, Л. Д., & Школьній, Є. П. (2007). *Методи обробки та аналізу гідрометеорологічної інформації (збірник задач і вправ): навчальний посібник*. Одеса: Екологія.
29. Гідрометеорологічний центр Чорного та Азовського морів. *Архів метеорологічних даних спостережень*.
30. *Стандартні кліматичні норми (1961-1990 рр.)*. (2002). Київ: [б. в.].
31. Смекалова Л. К., Швер Ц. А. (Ред.). (1986). *Клімат Одеси: монографія*.
32. Програма розвитку ООН (UNDP). *Цілі сталого розвитку*. <https://www.undp.org/uk/ukraine/tsili-staloho-rozvytku>

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

References

- 1 Lipinsky, V.M., Dyachuk, V.A., & Babichenko, V.M. (2003). *Climate of Ukraine*. Kyiv: Raievsky Publishing [in Ukrainian]
- 2 Cabinet of Ministers of Ukraine. (2024, May 30). Resolution No. 483-p on the approval of the Strategy for the Formation and Implementation of State Policy in the Field of Climate Change for the Period Until 2035 and Approval of the Operational Plan of Measures for its Implementation in 2024-2026. Retrieved from <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-skhvalennia-stratehii-formuvannia-ta-realizatsii-derzhavnoi-polityky-u-sferi-zminy-klimatu-na-period-t300524> [in Ukrainian]
- 3 Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., et al. (2021). *IPCC: Climate Change 2021: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (2391)*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- 4 IPCC. (2023). *Climate Change Information for Regional Impact and for Risk Assessment*. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis (1767-1926)*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.014>.
- 5 IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (p. 3056)*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.
- 6 IPCC. (2023). *Sections*. In *Climate Change 2023: Synthesis Report (35-115)*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.
- 7 Bednar-Friedl, B., et al. (2022). *Europe*. In *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (1817-1927)*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.015>.
- 8 Balabukh, V., et al. (2018). *Extreme weather events in Ukraine: Occurrence and changes*. In P. J. Sallis (Ed.), *Extreme Weather (pp. 85-106)*. London, UK: Intech Open.
- 9 Stepanenko, S. M., & Poloviy, A. M. (Eds.) (2018). *Climatic risks of the functioning of sectors of Ukraine's economy in the context of climate change*. Odesa: Odessa State Environmental University [in Ukrainian]
- 10 Reshetchenko, S. I., Dmytriev, S. S., Cherkashyna, N. I., & Goncharova, L. D. (2020). *Climate indicators of changes in hydrological characteristics (a case of the Psyl River basin)*. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*, 53, 155-168. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-53-12>.
- 11 Zamfirova, M. S., & Khokhlov, V. M. (2020). *Air temperature and precipitation regime in Ukraine in 2021-2050 based on the CORDEX ensemble models*. *Ukrayins'kyi hidrometeorologichnyy zhurnal*, 25, 17-27. <https://doi.org/10.31481/uhmj.25.2020.02> [in Ukrainian]

- 12 Goncharova, L. D., Prokofiev, O. M., & Reshetchenko, S. I. (2022). Features of climate-geographical distribution of atmospheric precipitation in southern Ukraine. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*, (57), 81-94. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-07> [in Ukrainian]
- 13 Goncharova, L. D., et al. (2017). Modern dynamics of temperature regime in the Eastern European region during main and transition seasons. I All-Ukrainian Hydrometeorological Congress with International Participation: Conference Proceedings. Odesa. [in Ukrainian]
- 14 Borovska, H., & Khokhlov, V. (2023). Climate data for Odesa, Ukraine in 2021-2050 based on EURO-CORDEX simulations. *Geoscience Data Journal*, 11, 148-159. <https://doi.org/10.1002/gdj3.197>.
- 15 Voloshyna, Z. V. (Ed.). (2010). Climatic resources of Odesa region for sustainable development: A scientific-practical guide. Odesa: State Hydrometeorological Service of Ukraine [in Ukrainian]
- 16 Helevera, O., Mostipan, M., & Topolnyi, S. (2023). Long-term dynamics of air temperature during winter and spring seasons 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> [in Ukrainian]
- 17 Pyasetska, S. V., & Shcheglov, O. M. (2023). Current trends in monthly average air temperature changes during 2006-2020. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*, (58), 217-230. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-17> [in Ukrainian].
- 18 Barabash, M. B., & Tatarchuk, O. G. (2009). Practical research directions in climate change in Ukraine. *Naukovi pratsi UkrNDHMI*, 57, 28-36 [in Ukrainian]
- 19 Khomenko, I. A., et al. (2024). Zoning of Ukraine's territory by vulnerability to climate change and selection of optimal adaptation paths. Materials of the 79th Reporting Scientific Conference of the Faculty of Hydrometeorology and Ecology of Odesa National University Named After I. I. Mechnikov. Odesa: Odesa I.I. Mechnikov National University [in Ukrainian]
- 20 Ivus, G.P., Goncharova, L.D., Kosolapova, N.I., & Zubkovych, C.O. (2018). Modern seasonal features of the risk mode on the territory of Odesa region. *Review Scientific Journal (Science)*, 1(3), 27-33. Retrieved from <http://archive.ws-conference.com/wp-content/uploads/pw0774.pdf>.
- 21 Goncharova, L.D. (2014). Tropospheric and stratospheric air currents in the Northern Hemisphere. Odesa: TES [in Ukrainian]
- 22 Goncharova, L.D., Prokofiev, O.M., Reshetchenko, S.I., & Chernychenko, A.V. (2021). Influence of atmospheric macroprocesses on the spatial distribution of precipitation over Ukraine during the spring season. *Ukrayins'kyi hidrometeorologichnyi zhurnal*, 27, 5-15. <https://doi.org/10.31481/uhmj.27.2021.01> [in Ukrainian].
- 23 Goncharova, L.D., & Prokofiev, O. M. (2021). Climate-geographical features of precipitation distribution over Ukraine in the autumn period. *Ekologichni nauky*, 2(35), 94-98. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.2-35.16> [in Ukrainian]
- 24 Goncharova, L.D., & Kosolapova, N.I. (2017). The influence of main teleconnections of the Northern Hemisphere on precipitation regime over Ukraine. *Visnyk Odes'koho natsional'noho universytetu. Seriya «Heohrafichni ta heolohichni nauky»*, 22(1), 11-27 [in Ukrainian].
- 25 Prokofiev, O.M., & Goncharova, L.D. (2021). Statistical characteristics of daily sums of atmospheric precipitation in Odesa region under global climate change conditions. *Visnyk Odes'koho natsional'noho universytetu. Seriya «Heohrafichni ta heolohichni nauky»*, 26(1), 67-80. [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2021.1\(38\).234679](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2021.1(38).234679) [in Ukrainian]
- 26 Lipinsky, V.M., Osadchyi, V.I., & Babichenko, V.M. (Eds.). (2006). Extreme meteorological events in Ukraine in the last two decades (1986-2005). Kyiv. [in Ukrainian]
- 27 Goncharova, L.D., & Prokofiev, O.M. (2024). Dynamics of specific atmospheric precipitation indicators in southern Ukraine for 1961-2020: Monograph. Odesa. Retrieved from <http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/13060> [in Ukrainian]
- 28 Goncharova, L. D., & Shkolny, Y. P. (2007). Methods for processing and analyzing hydrometeorological information (problem set and exercises): A tutorial. Odesa: Ecology [in Ukrainian]
- 29 Archive of meteorological observation data. Provided by the Hydrometeorological Center of the Black and Azov Seas.
- 30 Standard climatic norms (1961-1990) (p. 446). Kyiv, 2002 [in Ukrainian]
- 31 Smekalova, L. K., & Shver, T. A. (Eds.). (1986). The climate of Odessa. [in Ukrainian]
- 32 United Nations Development Program (UNDP). Sustainable Development Goals. Retrieved from <https://www.undp.org/uk/ukraine/tsili-staloho-rozvytku> [in Ukrainian]

Аналіз динаміки температурного режиму північно-західного Причорномор'я в контексті глобальних кліматичних змін

Олег Прокоф'єв^{1,2}

к. геогр. н., доцент, завідувач кафедри метеорології та кліматології,

¹ Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, Одеса, Україна;
старший науковий співробітник відділу кліматично орієнтованих агротехнологій

² Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства НААН України

Людмила Гончарова¹

к. геогр. н., доцент кафедри метеорології та кліматології

Температура повітря, як одна з основних метеорологічних величин, визначає характер та режим погоди, впливає на різнобічну життєдіяльність людини будь якої території. У статті, на прикладі станції Одеса, пропонується статистичний підхід до визначення регіональних відгуків у температурному режимі Північно-Західного Причорномор'я у зв'язку з глобальними кліматичними змінами. Проаналізована база емпіричних даних за 2790 зимових календарних днів періоду 1991-2023 рр., в яких 60% спостерігалась додатна середня добова температура повітря. Отримані показники порівнювались зі стандартною кліматичною нормою 1961-1990 рр.. Проаналізована середня міждобова мінливість температури повітря, досліджена динаміка екстремальних температур повітря у період 1961-2023 роки. Визначено число днів і тривалість періоду з низькою температурою повітря ($-10,0^{\circ}\text{C}$ і нижче). З'ясовано, що початок ХХІ століття характеризується зменшенням числа днів з низькою температурою повітря $-10,0^{\circ}\text{C}$ і нижче, тобто в регіоні відмічаються більш теплі зими (порівняно з періодом 1961-1990 рр.). Наводяться значення абсолютної амплітуди температури повітря, які розраховувалися для кожного місяця зимового сезону за значеннями добових максимумів та добових мінімумів температури повітря. Визначена добова аперіодична амплітуда температури повітря. На ст. Одеса за одинадцять останніх років зареєстровано 65 періодів з відлигою, які за сезон налічували 539 днів. Найчастіше (42% загального числа днів) вони повторювалися у січні – 32 випадки; у грудні таких випадків зареєстровано 15, що складає 28% та у лютому – 30% (18 випадків). Запропонований статистичний підхід (на прикладі конкретної станції) є певним внеском у вивченні як теоретичних, так і практичних аспектів дослідження термічного режиму окремих територій з використанням емпіричних даних. Отримані результати можуть бути враховані для вирішення конкретних соціально-економічних та природно-екологічних проблем, перспективного планування та адаптації різних галузей економіки в умовах глобальних кліматичних змін.

Ключові слова: клімат, показники термічного режиму, календарний сезон, багаторічні характеристики, температурна мінливість, відлига.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 18 січня 2025 р.

Прийнята 26 лютого 2025 р.

Assessment of the wind and wave energy potential in the water area of the Caspian Sea

Vusala Rasulzadeh

PhD Student, Junior Researcher,

Institute of Geography named after Academician Hasan Aliyev, Baku, Azerbaijan,

e-mail: resulzade323@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0002-0575-6101>

ABSTRACT

Problem statement. In modern times, the rapid increase in energy demand in the world and the environmental consequences of traditional energy sources make it necessary to switch to alternative energy. The use of alternative energy is not only important for environmental protection, but also reduces the dependence of countries and economic systems on oil, gas and their prices. At the same time, global problems such as climate change and air pollution increase the importance of renewable energy sources.

Purpose. The main goal of the research is to scientifically assess the wind and wave energy potential in the Caspian Sea and to justify this energy production with calculations.

Research methods. In the article, the wind and wave field of the Caspian Sea was studied in order to exploit the potential of wind and wave energy, and the energy of the obtained energy was calculated. To develop the wind parameters, data from three databases were used, two of which were space data and one was long-term operations. To increase the power of the waves and the energy obtained from them with both northern and southern winds, terrestrial data were used. Based on the obtained data, plans for the payment of wind and wave energy in the Caspian Sea were drawn up.

Conclusion. Using the natural potential of the Caspian Sea, the involvement of alternative energy sources in the production of electricity and heat will allow for progressive changes in the future development directions of electricity. The affordable geographical location and climatic conditions of the Caspian Sea region allow for the widespread use of environmentally friendly alternative energy sources such as wind and wave energy. This will not only save a lot of fuel burned in thermal power plants, but will also significantly reduce the amount of hazardous waste discharged into the environment. As a result of the conducted research and calculations, it was determined that the amount of wind energy that can be obtained using the FL 2500_90 type wind turbine at selected points on the Absheron Peninsula and the coastal zone adjacent to it is approximately 5–7 GW/h, and from the Northwind 100C (95 kW) type wind turbine – 0.33 GW/h. At the same time, the capacity factor (CF) of wind turbines at these points varies in the range of 25–33% and 35–40% respectively. It was determined that in the region there is some difference in terms of wave annual average energy potential. Thus, for northern and northwestern winds, the wave energy density varies in the range of approximately 15,000–35,000 kW/m, and for southern and southeastern winds, it varies in the range of 20,000–35,000 kW/m.

Keywords: *Caspian Sea, wind speed, wind direction, wind energy, wave energy, wind rose, Rayleigh distribution, Weibull distribution.*

In cites: Rasulzadeh Vusala (2025). Assessment of the wind and wave energy potential in the water area of the Caspian Sea. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (62), 315–323. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-23>

Introduction. In recent years, the rising trend of electricity generation by renewable energy is taking a positive way all over the world. Owing to growth of renewable energy resource, the wind energy generation is ahead of all natural resources. There are some noteworthy reasons that played constructive role in development of wind energy generation including atmosphere, state-of-the-art design of wind turbines, and low cost [8].

In the modern era, when switching to alternative energy, one of the main issues is the assessment of the natural potential of alternative energy sources in the world, including in Azerbaijan, and the adoption of necessary measures for their optimal use. Favourable climatic conditions and the geographical location of our republic create the basis for the effective use of renewable energy sources, such as wind, solar, wave, geothermal, etc. The Absheron Peninsula and the surrounding areas are characterized by strong and stable winds throughout the year, especially the northerly winds blowing at a speed of 6–8 m/s and more,

making this zone a favourable place for wind energy. At the same time, the permanent wave processes occurring on the coastline of the Caspian Sea indicate the presence of suitable climatic conditions for the use of wave energy. When studying the efficiency of using the renewable energy potential of any geographical region, the natural potential is assessed first, and at subsequent stages—technical, economic and market potential [18]. In the current work, the natural potential of wind and wave energies in the Caspian Sea region is studied, based on multi-year satellite and ground measurement data obtained from various bases. Additionally, it should be noted that the technical wind energy potential was also estimated by taking into account the characteristics of small and medium power wind turbines. The potential for wind energy in offshore areas is considered much higher than onshore areas due to the presence of more stable and intense winds. The integration of wind and wave energies is considered technically and economically viable due to their natural compatibility

and the possibility of combining them within the same infrastructure.

Wind and wave regime of the Caspian Sea.

The Caspian Sea, which is unique and rich in natural resources, also plays the role of a climatic and ecological indicator of our planet. Located between latitudes 47°07'N and 36°33'N and longitudes 45°43'E and 54°03'E, the sea is surrounded by 5 countries. The surface area of the Caspian Sea, which stretches for 1200 km along the meridian, is 392.600 km².

The Caspian Sea, which is considered one of the windiest seas in the world, experiences hurricane winds for 250 days a year. Wind is the horizontal movement of air from a high pressure area to a low pressure area. The speed and direction of the wind are determined by factors such as the nature of the general circulation of the atmosphere, the temperature field created by the wind itself, the relief of the coasts, etc. [20].

During the winter, the weather in the northern Caspian is dominated by the Asiatic anti-cyclone which creates easterly cold winds. During the summer, the weather is dominated by the Azores high-pressure that causes northerly winds. The region is also subjected to extra tropical cyclones at the rate of about 10 storms per year [14].

According to the general regularity of the wind regime, winds with a northern (north-western, north, north-eastern) and south-eastern direction prevail over the Caspian Sea. The probability of the formation of wind fields with a northern direction throughout the year is 41%, but in summer this probability increases slightly compared to other seasons and reaches 48.7%. Approximately half of them fall on the north-western direction. Northern direction winds are observed during the spread of the branches of the Azores anticyclone to the southern regions, the movement of the Barents and Kars, Scandinavian anticyclones, as well as during the activation of the southern Caspian anticyclone, which subsequently moves in a north-eastern direction and enters the western regions of Central Asia. Southeast winds make up an average of 35.9% of the annual wind speed. They are most often observed in winter, when an anticyclone is formed over Kazakhstan and the regions of Central Asia (41.3%). This anticyclone creates favorable conditions for the movement of air masses in a south-easterly direction. The most persistent of the wind types blowing over the Caspian Sea are south-easterly winds. The average annual wind speed within the sea area is in the range of 4-6 m/s [20]. When evaluating the performance of a selected turbine, the height of the turbine hub is approximated based on the logarithmic law of wind speed.

The wind regime of the Caspian Sea is defined by three principal factors: regional atmospheric activity, topography of the coasts (orography) and local

circulation induced by the thermal increments between the land and sea [15].

The largest wave sizes in the North Caspian Sea are as follows: height -3 m, period-10 seconds, length - 85 m. The average wave values in this part of the sea are as follows: Average wave height – 0.5-0.7 meters, average wave period – 3-5 seconds (Kudryavtsev et al., 2019), average wave length –20-40 meters (Holthuijsen, 2017). In places of increasing depth, waves with a height of 2 m are observed, towards the south their height increases, and in some places they reach 4 m and more. In the western part of this region of the sea, southeast and east waves prevail, and in the northeastern part, west and east waves.

The waves in the Middle and South Caspian Seas have the following characteristic features: The most persistent storm winds and corresponding waves are observed in the Baku-Absheron Peninsula, Makhachkala-Derbend, and Fort-Shevchenko regions. The largest waves in the Caspian Sea are formed in the waters of the Absheron Peninsula. The center of storm waves has a wave height of 7.5-8 meters, and in extreme storms, the heights reach 9-10 meters [20].

Material and method. To comprehensively study the wind and wave power in the Caspian Sea, data from 3 separate databases were used. As the 1st database, the multi-year ground observations [19] was used. Those data covered a total of 60 points of Caspian Sea in which the wind speed and wave parameters (height, period, length, phase velocity) were measured. The 2nd database is NASA's [12] space database covering 2001-2022, with a resolution of 0.5x0.625. The 3rd database is the Global Wind Atlas [5], which includes wind speed and direction data. The multi-year ground-based observations are for a height range of 10 meters, and the space-based data are for a height range of 50 meters.

Wind power calculation. Wind power P is proportional to the cube of the wind speed v and is calculated by the formula:

$$P = \frac{\rho}{2} v^3 \quad (1)$$

Here, $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ is the air density.

The energy that can be obtained from wind depends very strongly on the distribution of wind speed. Thus, the energy produced in two different geographical locations with the same average speeds but very different standard deviations may be more than twice as much in the location with the larger standard deviation [4].

In a series of studies, for example, [1,2,3,4,11], based on the analysis of measured wind speed data, it has been found that the probability distribution function (PDF), $w_0(v)$, of wind speed in many geographical locations can be well approximated by Rayleigh

or Weibull distributions. In our study area, the probability of wind speed distribution is also well

described by Rayleigh, and very well by Weibull distribution (Fig. 1).

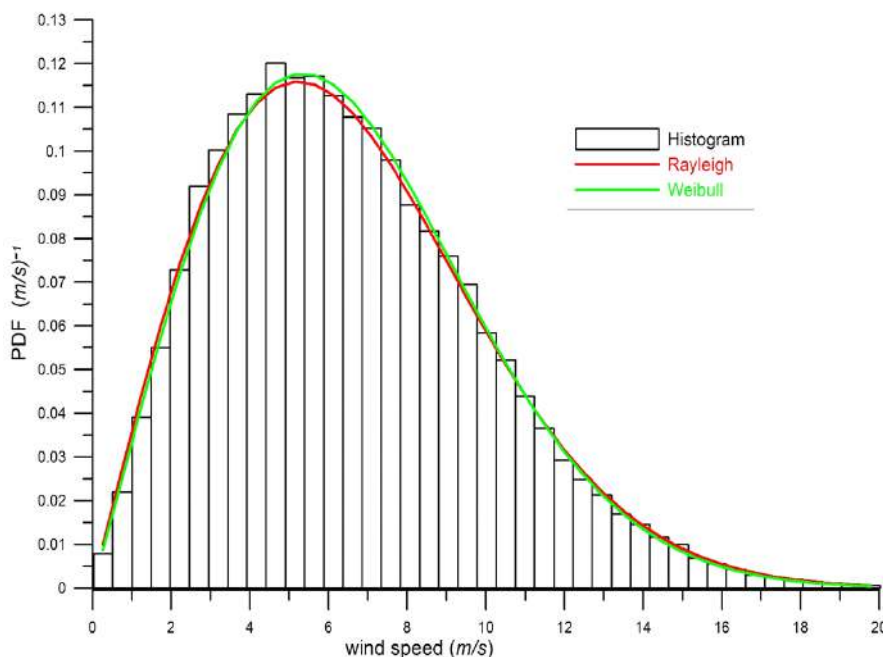


Fig. 1. Histogram of wind speed distribution in the Oil Rocks (40.33°N/50.6°S) during 2001-2022; approximation with Rayleigh and Weibull distributions

For average wind power from (1) is obtained:

$$\bar{P} = \frac{\rho}{2} \bar{v}^3 \quad (2)$$

If the wind speed distribution is the Weibull law, then (2) is transformed into the following formula:

$$\bar{P} = \frac{\rho}{2} a^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{b}\right) \quad (3)$$

Here $\Gamma(x)$ is the Gamma function; a, b are the parameters of the Weibull distribution, which are uniquely determined by the average wind speed $\bar{v}$ and the standard deviation σ_v [4].

Note that wind speed depends on altitude and varies with surface roughness; as altitude increases, wind speed increases [9]. The dependence of wind speed on altitude is theoretically expressed by a logarithmic law; however, an approximation of the measurement data by an exponent law is also used.

The efficiency of a wind turbine is characterized by its "power curve", which is a purely technical characteristic of the turbine and is determined by the manufacturer.

The capacity factor (CF) of a wind turbine for a selected geographical location is an indicator of the operational efficiency of the turbine to be installed there and is determined by the natural wind potential of the location (wind power distribution) and the turbine's "power curve". Thus, CF is the main criterion for selecting the type of turbine that will produce energy most efficiently at a given location [4]. The operating efficiency of a wind turbine at a selected site

is characterized by the capacity factor (CF) of the turbine, which is determined as a ratio of mean turbine power $\bar{P}_T = \int_0^\infty \bar{P}_T(v) w_0(v) dv$ to turbine-rated power P_r :

$$CF = \frac{\bar{P}_T}{P_r} \quad (4)$$

Thus, the energy that the wind turbine will produce in the time intervals $[0, T]$ is calculated by formula (5).

$$E_{[0, T]} = CF \cdot P_r \cdot T \quad (5)$$

Here P_r – is the nominal power of the turbine and is indicated in the technical documentation of the turbine [4].

In general, the density of wind energy at sea is higher than on land [10].

Wave power calculation. Wave power P (W/m) is calculated based on the following formula [16,17]:

$$P = \frac{\rho g^2 T h^2}{32\pi} \quad (6)$$

Here, h (m) is the wave height, T (sec) is the period, $g = 9.81 \text{ m/sec}^2$ is the acceleration of free fall, $\pi = 3.14$, ρ is the density of seawater. Although this value is 1030 kg/m^3 for ocean water, it is taken as $1000\text{--}1025 \text{ kg/m}^3$ for seawater. Since the density of seawater varies depending on depth, salinity, etc., it is difficult to give an accurate estimate. During the calculations, the average water density for the Caspian Sea was taken as 1020 kg/m^3 . Based on the wave

height h (m) and period T (sec) given in the "Hydro-meteorological Atlas of the Caspian Sea" [19], the wave power P (W/m) was calculated for each of the 60 points during both north, north-west and south-south-east winds. The amount of wave energy E (kWh) in existence during the year was calculated on the following formula:

$$E = P \cdot L \cdot T, T = 365 \cdot 24 \text{ (hour)} \quad (7)$$

Here, L (m) is the length of the wavefront and this value was taken as 1 meter.

The wave power P , i.e. the energy flux, is usually defined as the average power per meter of wave front length and is expressed in W/m. This given value means the average energy passing from the surface to the seabed per second under one meter of wave front [10].

Analysis and Discussion. Wind power and energy were calculated using formulas (3) and (5), respectively, and wave energy was calculated using formula (7). Based on the calculated data, wind speed, wind energy, and wave power maps were drawn.

Wind speed, wind power. The map compiled on the 1st database, (Fig. 2a) shows that the wind

speed varies between 2-6 m/sec. For considered turbines rotor hub height are 37, 120 meter are respectively and corresponding wind speed at those height we're determining according to the logarithmic law. The places where the wind speed is the highest are the Azerbaijani sector, especially the coasts of Baku and the Absheron Peninsula. The wind speed gradually decreases towards the north. But it takes its lowest value in the South Caspian.

In the wind map compiled based on NASA satellite data (Fig. 2b), the values of wind speed also vary in the range of 2-6 m/s. Here too, the lowest values are in the southern part of the sea. However, the places where the maximum values are observed are seen further north.

If we look at the map compiled on the basis of data taken from the "Global Wind Atlas" database (Fig. 2c), we will see that the change in the southern part of the sea is the same as in the other two regions. However, the difference is manifested in other parts of the sea. In almost all of the Northern Caspian and most of the Middle Caspian, the wind speed varies within the range of 5-6 m/s.

Figure 3 shows the distribution of wind power in

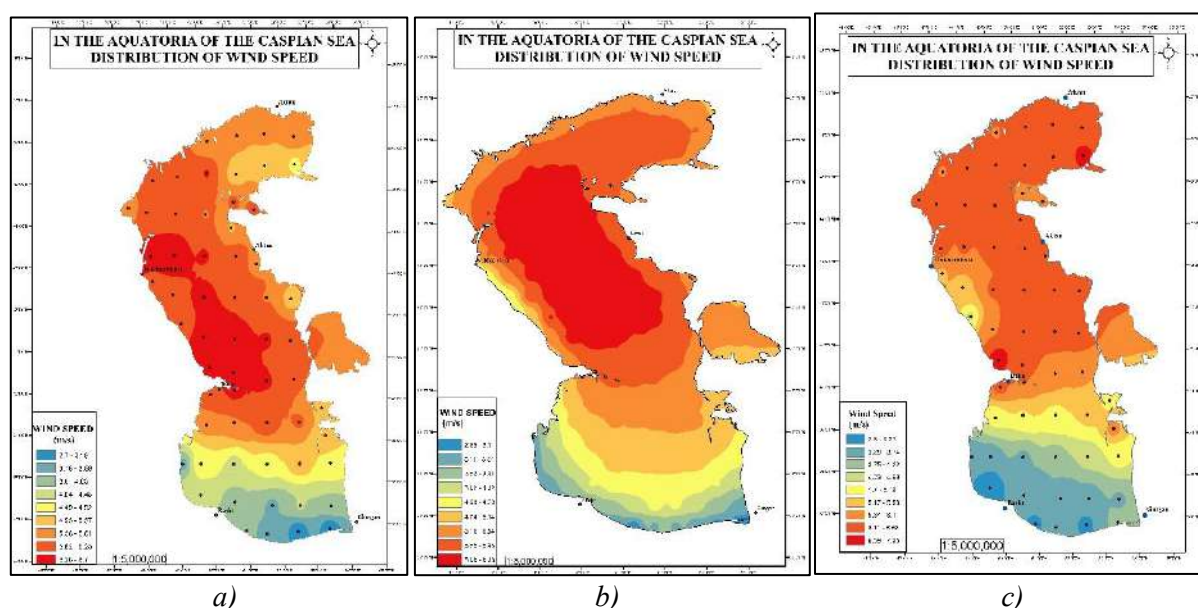


Fig. 2. Wind speed distribution map in the Caspian Sea area (a-Based on multi-year ground observation data; b-Based on NASA database; c-Based on Global Wind Atlas)

the Caspian Sea based on data obtained from various sources. Thus, in the map prepared based on data obtained from ground-based data, the wind power varies in the range of 23-354 W/m². The areas with the highest wind power are the coasts of Baku and the Absheron Peninsula (Fig. 3a).

In the map based on the NASA database [12], the wind power varies in the range of 23-304 W/m². The maximum value is observed more in the middle part of the sea, and the minimum value is observed in the southern part (Fig. 3b).

In the map based on the data taken from the Global Wind Atlas database [5], the wind power varies in the range of 58-518 W/m². The maximum value is higher than the value shown in the other two maps, but here it is also observed in the center of the sea (Fig. 3c).

An analysis of the trend of change in the annual average wind speed for the 10 sites considered for the period 2001-2022 shows a weak increasing trend in some sites (Figure 4), while the "wind rose" has noticeably shifted northward (Fig. 5).

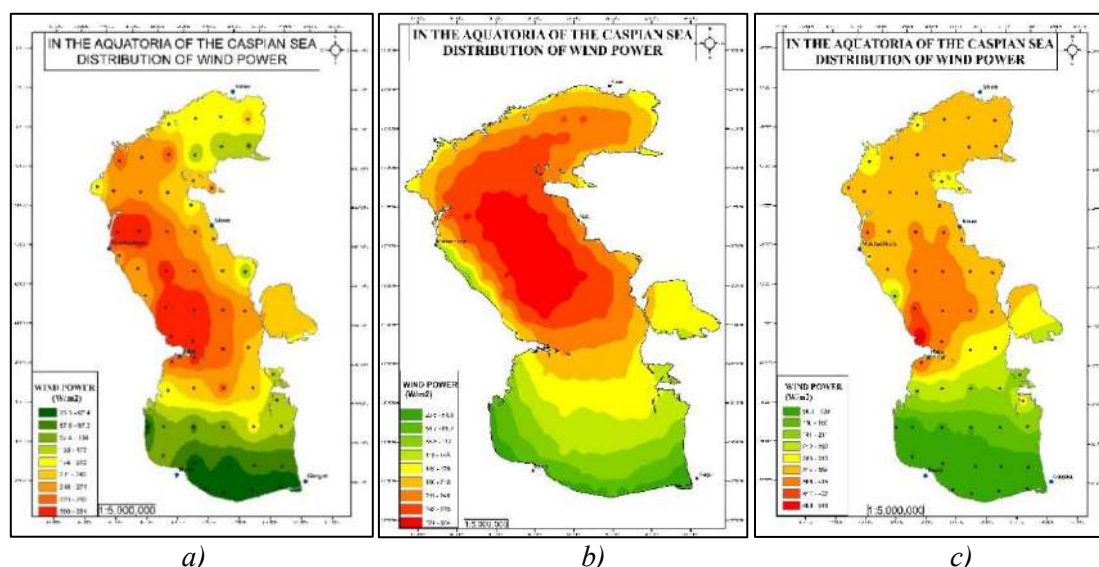


Fig. 3. Wind power distribution map in the Caspian Sea (a-Based on multi-year ground observation data; b-Based on NASA database; c-Based on Global Wind Atlas)

Thus, it is concluded that climate change has not reduced wind speed, but has even increased it slightly, which is a positive result in terms of using wind energy.

Wind rose diagrams are very helpful in defining the prevailing wind direction, the directional quantification of total energy and the direction of maximum wind speed intensity [13].

Five points with high wind speeds were selected in the Azerbaijani sector of the Caspian Sea (Figure 6), and the statistical characteristics of the wind speed at those points, the parameters of the Weibull distribution, and the energy that two types of turbines (small “Northwind 100C, 95kW” and “FL 2500_90” medium-power) can produce in a year were calculated (Table 1). Notice that this types of turbines are intended for offshore conditions and previously were used.

The data shown in Table 1 were obtained from

long-term satellite observations and the wind speed was extrapolated to the central height of the selected turbine models.

Wave power. There are a wide range of technological solutions proposed for wave energy harvesting. A one-size-fits-all technology that encompasses a few technologies has not yet emerged. Instead, using local parameters such as water depth and wave climate (i.e. wave height and period) will allow us to determine what the best technology is for a given area [7].

Based on the calculated data, a distribution map of the annual wave energy potential per 1 meter of the wave front in the Caspian Sea was compiled (Figure 7). As can be seen, high wave energy is observed in the Middle Caspian during both northern, north-western, and southern, southeaster winds. In general, although the two maps are similar at first glance, there are differences between the quantities. Thus, the lowest value of the wave energy potential per 1 meter

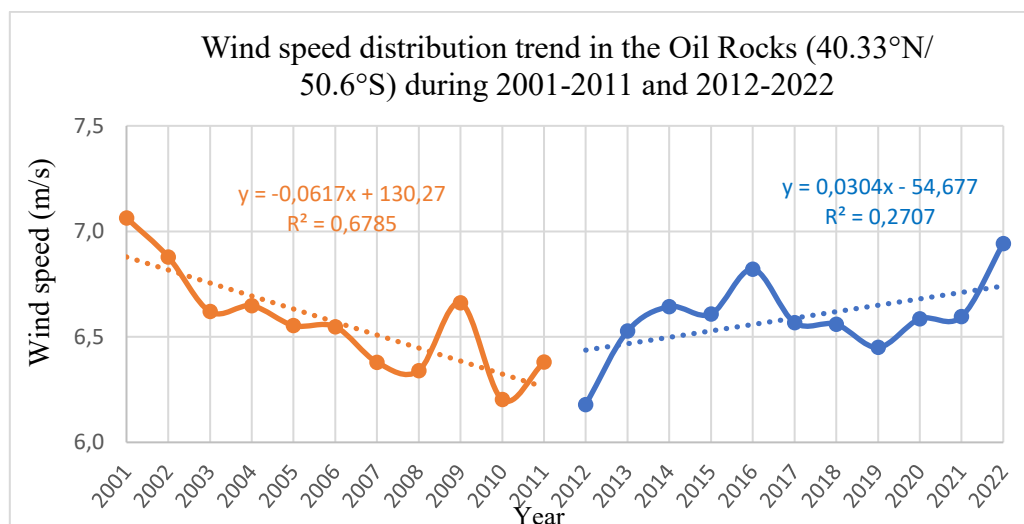


Fig. 4. Annual average wind speed change over the years in Oil Rocks (40.33°N/ 50.6°S)

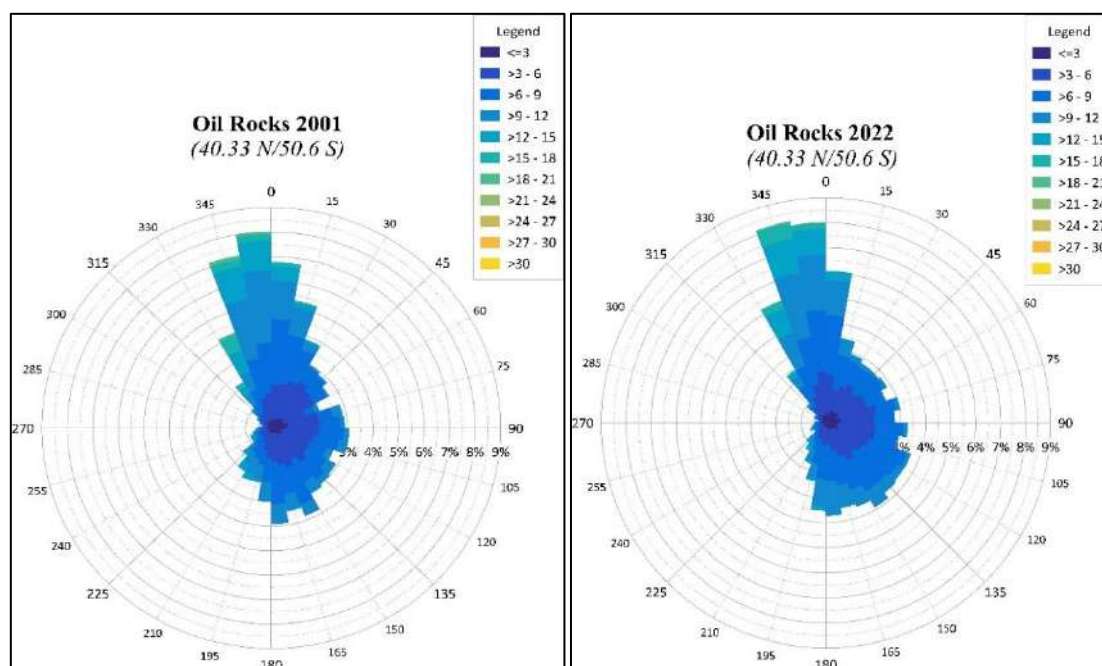


Fig. 5. Change in annual average wind direction over the years in Oil Rocks (40.33°N/ 50.6°S)

during northern and north-western winds is 145.4 kWh (Figure 7A), and during southern and south-eastern winds it is 128.5 kWh in the northern and southern parts of the Caspian Sea (Figure 7B). It is clear from the maps that the values of wave energy in the Caspian Sea are higher on the western coast than on the eastern coast. Especially high values are noticeable on the coast of Azerbaijan.

Wave power is often compared to wind power because the two energy sources have much in common physically, and wind has already proven itself as a viable energy source. A positive feature of wave power compared to wind power is that the average power delivered by waves varies more slowly than the sometimes very rapid changes in wind speed and direction [17].

It should be noted that S. Hadadpour et al. [6]

studied the wave power assessment at Anzali station on the Iranian coast of the Caspian Sea, and they found the annual average value of the wave power $P=0.66$ (kW/m). This corresponds to the wave energy value $E=5782$ (kWh/m) shown in Figures 7A and 7B.

Conclusion. As a result of studies conducted on the basis of satellite and ground observation data, we can note that the wind speed in the Caspian Sea varies approximately in the range of 2.7-7 m/s. The minimum wind speed falls on the southern Caspian, and the maximum speed falls on the average partly on the northern Caspian (according to the NASA and Global Wind Atlas databases). The distribution of wind power in the Caspian Sea corresponds to the distribution of wind speed. Thus, the wind power mainly varies in the range of 23-350 W/m², and according to the Global Wind Atlas database, it varies in the range of

Table 1

Calculated parameters for the area under consideration

Point №	1	2	3	4	5
Coordinate (°N/°S)	40.76/ 49.50	40.33/5 0.6	40.51/5 0.16	41.02/5 0.07	40.22/5 0.19
Average wind speed, $\bar{v}$ (m/s)	6.77	6.58	6.66	7.13	6.25
Standard deviation, σ_v (m/s)	3.70	3.36	3.38	3.46	3.28
Weibull parameter, a	7.62	7.44	7.50	8.05	7.07
Weibull parameter, b	1.95	2.05	2.03	2.15	2.06
Average wind power, $\bar{P}$ (W/m ²)	365.8	335.9	348.3	427.3	287.8
CF, % "FL 2500 90" Wind turbine	29.9	28.1	28.7	33.0	25.2
Energy, $E_{[0,1 \text{ year}]}$, (GW·hour) "FL 2500 90"	6.54	6.12	6.31	7.26	5.54
CF, % "Northwind 100C,95kW" wind turbine	40.1	39.4	39.9	40.3	35.6
Energy, $E_{[0,1 \text{ year}]}$, (GW·hour) "Northwind 100C,95kW"	0.334	0.328	0.332	0.335	0.296

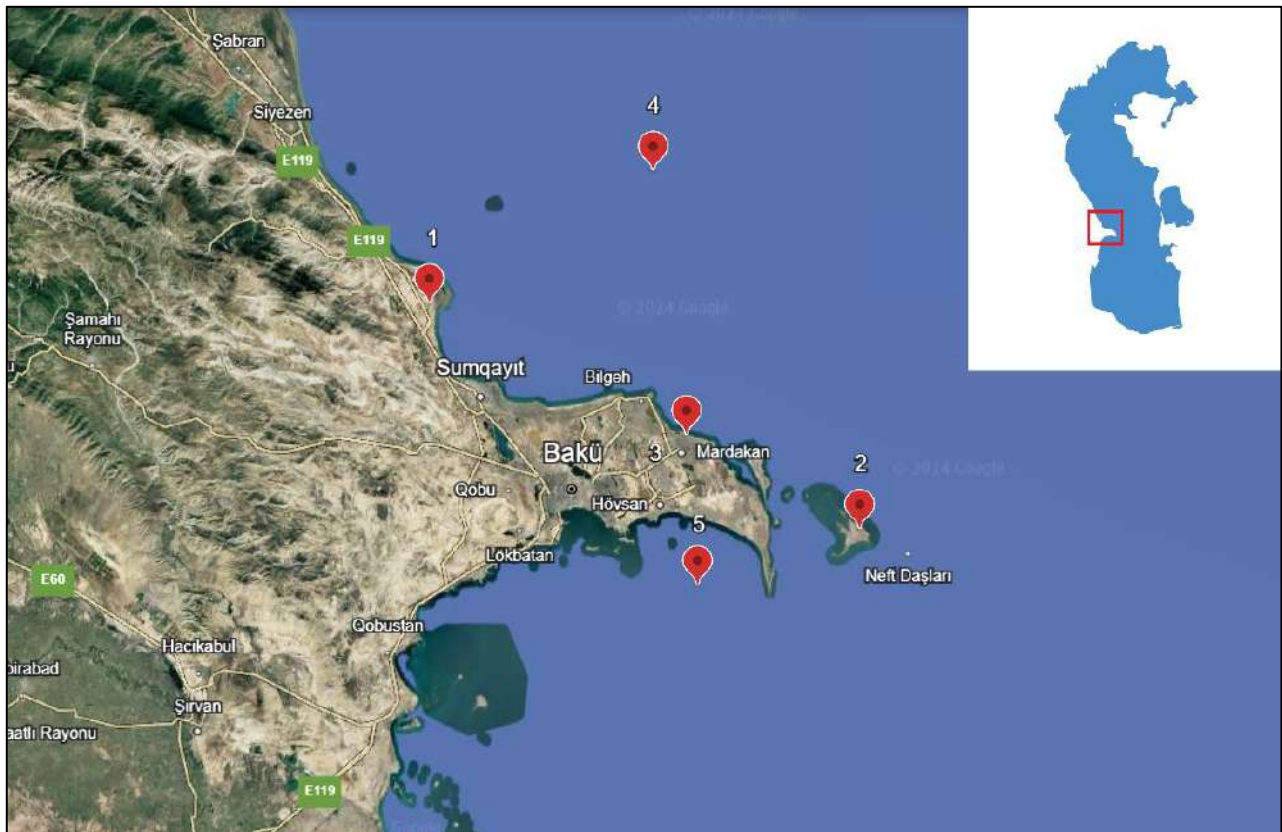


Fig. 6. Satellite image of survey points

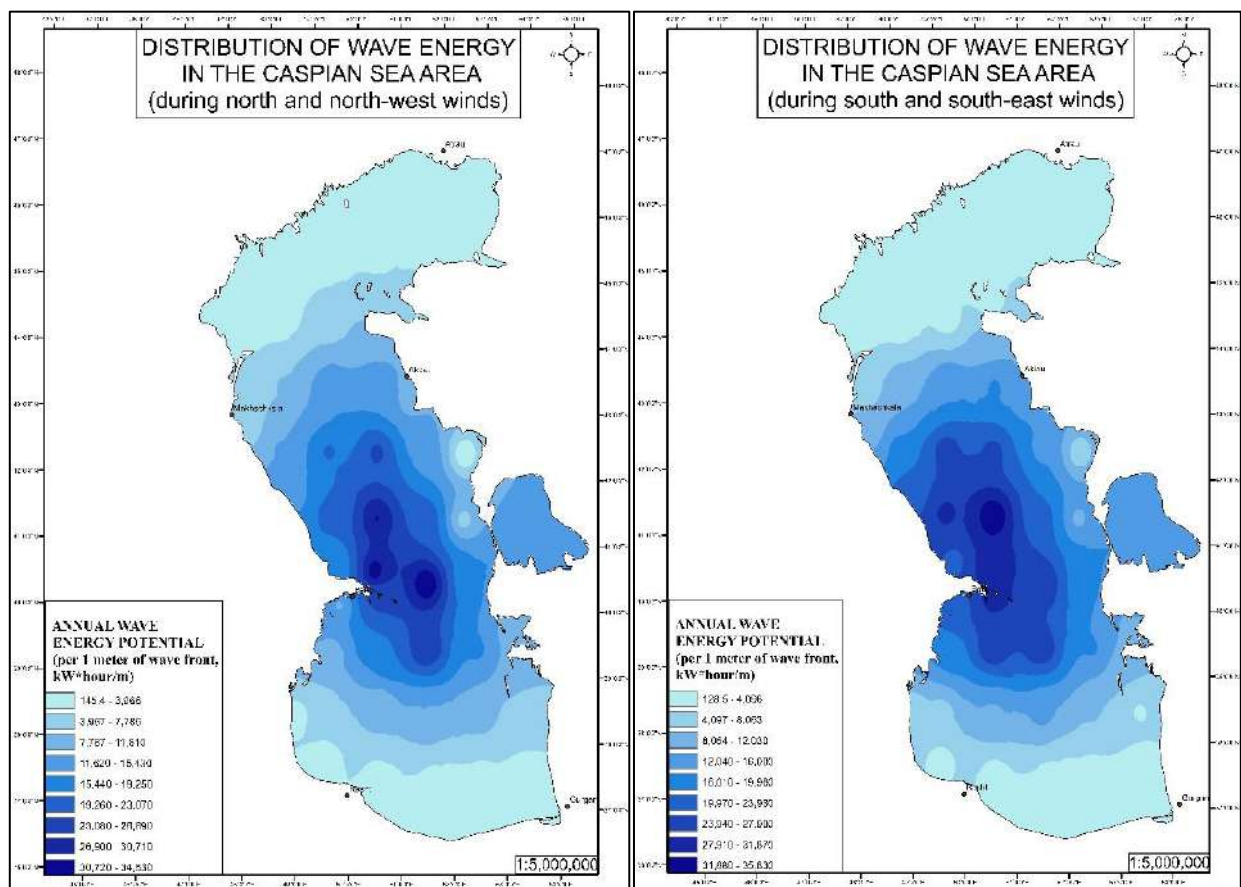


Fig. 7. Annual wave energy distribution map in the Caspian Sea (Based on multi-year ground-based observation data)

58-518 W/m².

The potential of wave energy in the Azerbaijani sector of the Caspian Sea is high. In particular, this indicator takes the highest values off the coasts of Baku and the Absheron Peninsula. Here, the wave energy potential is 15000-35000 kWh/m during north and north-west winds, and 20000-35000 kWh/m during south and south-east winds. If we look at the Azerbaijani sector as a whole, it takes values between

3000-35000 kWh/m during north and north-west winds, and 8000-35000 kWh/m during south and south-east winds.

There is sufficient wave and wind energy in the Absheron Peninsula and nearby areas, especially in the oil-gas platforms. It is possible to make the electric energy usage in the platforms more efficient by replacing part of the energy used with these types of energy.

References

1. Ackere, S.V., Eetvelde, G.V., Schillebeeckx, D., Papa, E., Wyngene, K.V., Vandeveld, L. (2015). Wind Resource Mapping Using Landscape Roughness and Spatial Interpolation Methods. *Energies* 8 (8): 8682–8703. <https://doi.org/10.3390/en8088682>.
2. Carta, J. A., Ramirez, P., Velazquez, S. (2009). Review of Wind Speed Probability Distributions Used in Wind Energy Analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volume 13 (5), 933–955. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.05.005>.
3. Celik, A. N. (2003). Assessing the Suitability of Wind Speed Probability Distribution Functions Based on Wind Power Density. *Renewable Energy* 28 (10), 1563–1574. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(03\)00018-1](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00018-1).
4. Gardashov, E.R., Gardashov, R.H. (2024). On the derivation of an analytical expression for wind power probability distribution function and capacity factor of turbine. *International Journal of Sustainable Energy*, 43:1, 2390447. DOI: <https://doi.org/10.1080/14786451.2024.2390447>
5. Global Wind Atlas: [Electronic resource]. URL: <https://globalwindatlas.info/en>.
6. Hadapour, S., Shahidi, A.E., Kamranzad, B. (2014). Wave energy forecasting using artificial neural networks in the Caspian Sea. *Maritime Engineering*, London: 167, 1, 42-52.
7. Holmberg, P., Andersson, M., Bolund, B., Strandanger, K. (2011). Wave Power Surveillance study of the development *Elforsk rapport 11:02*, Stockholm, 5.
8. Hulio, Z.H. (2021) Assessment of Wind Characteristics and Wind Power Potential of Ghara, Pakistan. *Hindawi Journal of Renewable Energy*. <https://doi.org/10.1155/2021/8960190>.
9. Khaligh, A., Onar, O.C. (2010). Energy harvesting. Boca Raton: 339.
10. Ma, X., Li, M., Li, W., Liu, Y. (2025). Overview of Offshore Wind Power Technologies. *Sustainability*, 17, 596. <https://doi.org/10.3390/su17020596>.
11. Morgan, E.C., Lackner, M., Vogel, R.M. (2006). Probability Distributions for Offshore Wind Speeds. *Energy Conversion and Management* 52 (1): 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.015>.
12. NASA POWER: [Electronic resource]. URL: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
13. Rehman, S., Natarajan, N., Mohandes, M.A., Meyer, J.P., Alam, M.M., Alhems, L.M. (2022). Wind and wind power characteristics of the eastern and southern coastal and northern inland regions, South Africa. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 85842–85854. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14276-9>.
14. Rusu, E., Onea, F. (2013). Evaluation of the wind and wave energy along the Caspian Sea. *Energy*, 50. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.11.044>.
15. Sergey A., Lebedev and Andrey G. Kostianoy. (2008). Integrated Use of Satellite Altimetry in the Investigation of the Meteorological, Hydrological, and Hydrodynamic Regime of the Caspian Sea. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 19, 1-2, 71-82. doi: [https://doi.org/10.3319/TAO.2008.19.1-2.71\(SA\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2008.19.1-2.71(SA))
16. Thorpe, T.W. (1999). *A Brief Review of Wave Energy A report produced for The UK Department of Trade and Industry*. Harwell.
17. Waters, R. (2008). *Energy from ocean waves*. Uppsala, 19.
18. Gardashov, R.H. Artificial intelligence and renewable energy. *ANAS Transactions*.
19. Mammadov, R.M. (2014). *Hydrometeorological Atlas of the Caspian Sea*. Baku: 300 [in Azerbaijani].
20. Mammadov, R.M. (2013). *Hydrometeorology of the Caspian Sea*. Baku: 173 [in Azerbaijani].

Оцінка потенціалу вітрової та хвильової енергії в акваторії Каспійського моря

Вусала Расулзаде

аспірант, мол. наук. співробітник,

Інститут географії імені академіка Гасана Алієва, Баку, Азербайджан

У сучасний час швидке зростання попиту на енергію у світі та екологічні наслідки традиційних джерел енергії роблять необхідним перехід на альтернативну енергетику. Використання альтернативної енергії важливе не лише для захисту навколишнього середовища, але й зменшує залежність країн та економічних систем від нафти, газу та цін на них. Водночас глобальні проблеми, такі як зміна клімату та забруднення повітря, підвищують важливість відновлюваних джерел енергії. У статті досліджувалося поле вітру та хвиль Каспійського моря з метою використання потенціалу енергії вітру та хвиль, а також розраховувалася енергія отриманої енергії. Для розробки параметрів вітру використовувалися дані з трьох баз даних, дві з яких були космічними даними, а одна - довгостроковими операціями. Для збільшення потужності хвиль та енергії, що отримується від них як при північних, так і при південних вітрах, використовувалися наземні дані. На основі отриманих даних були складені плани оплати вітрової та хвильової енергії в Каспійському морі. Використання природного потенціалу Каспійського моря, залучення альтернативних джерел енергії у виробництво електроенергії та тепла дозволить здійснити прогресивні зміни в майбутніх напрямках розвитку електроенергетики. Доступне географічне розташування та кліматичні умови Каспійського регіону дозволяють широко використовувати екологічно чисті альтернативні джерела енергії, такі як енергія вітру та хвиль. Це не тільки дозволить значно заощадити паливо, що спалюється на теплових електростанціях, але й значно зменшить кількість небезпечних відходів, що викидаються в навколишнє середовище. В результаті проведених досліджень та розрахунків було визначено, що кількість вітрової енергії, яку можна отримати за допомогою вітрової турбіни типу FL 2500_90 у вибраних точках на Апшеронському півострові та прибережній зоні, що прилягає до неї, становить приблизно 5–7 ГВт/год, а від вітрової турбіни типу Northwind 100С (95 кВт) – 0,33 ГВт/год. Водночас, коефіцієнт використання потужності (КВ) вітрових турбін у цих точках коливається в діапазоні 25–33% та 35–40% відповідно. Було визначено, що в регіоні існує деяка різниця в середньорічному енергетичному потенціалі хвиль. Так, для північних та північно-західних вітрів щільність енергії хвиль коливається в діапазоні приблизно 15 000–35 000 кВт/м², а для південних та південно-східних вітрів – в діапазоні 20 000–35 000 кВт/м².

Ключові слова: *Каспійське море, швидкість вітру, напрямок вітру, енергія вітру, енергія хвиль, роза вітрів, розподіл Релея, розподіл Вейбулла.*

Надійшла 7 лютого 2025 р.

Прийнята 10 квітня 2025 р.

Локальна геоінформаційна система земель лісового фонду: методичні особливості створення, практичні аспекти та перспективи використання

Василь Роман¹

викладач кафедри лісівництва,

¹ Ужгородський національний університет, Ужгород, Україна,

e-mail: [vasyl.roman@uzhnu.edu.ua](mailto:vasyly.roman@uzhnu.edu.ua),  <https://orcid.org/0009-0006-4139-5872>;

Микола Карабінюк¹

к. геогр. н., доцент кафедри фізичної географії та раціонального природокористування,

e-mail: mykola.karabiniuk@uzhnu.edu.ua,  <https://orcid.org/0000-0001-9852-7692>;

Андрій Мигаль¹

к. біол. н., доцент кафедри лісівництва,

e-mail: andriy.myhal@uzhnu.edu.ua,  <https://orcid.org/0000-0002-6319-1516>;

Анастасія Кічура¹

к. с.-г. н., доцент кафедри лісівництва,

e-mail: anastasia.kichura@uzhnu.edu.ua,  <https://orcid.org/0009-0005-0344-0831>;

Світлана Чепур¹

к. с.-г. н., доцент кафедри лісівництва,

e-mail: svitlana.chepur@uzhnu.edu.ua,  <https://orcid.org/0009-0008-9862-3594>

У сучасному світі інформаційні системи і технології відіграють ключову роль у розвитку суспільства і держави. Особливо актуальним є розвиток геоінформаційних систем як один з елементів забезпечення сталого розвитку в природокористуванні. Ліси є найбільш збалансованими екосистемами, які виконують різноманітні корисні для людини функції, а також є одним із основних джерел відновлюваної енергії. Впровадження ГІС у природокористування, особливо у сфері лісового господарства, дозволяє досягнути ключових цілей сталого розвитку, а розробка методів щодо удосконалення існуючих або створення нових ГІС має визначальне значення. У роботі представлено методичні особливості створення геоінформаційної системи об'єктів лісового фонду на прикладі окремого лісництва. Вихідними даними для створення ГІС слугують плани лісонасаджень та таксаційні описи лісництва. Описаний нами алгоритм складається з таких основних етапів: отримання вихідних даних, цифровізація і просторова прив'язка картографічних матеріалів, формування таблиць з атрибутивними даними, об'єднання просторових даних із атрибутами, перевірка функціональності створеної ГІС. Всі етапи створення виконувались із використанням найбільш відомих програмних продуктів: QGIS, MS Excel, MS Access, Adobe Photoshop. У статті значна увага приділена особливостям формування атрибутивних даних та способам їх подальшого застосування у поєднанні із векторними шарами. Пропонований нами алгоритм дозволяє на основі планів лісових насаджень створити просторовий векторний шар таксаційних виділів з деякою атрибутивною інформацією, а на основі таксаційних описів – створити набір атрибутивних даних. Разом ці два набори даних можуть утворювати окрему геоінформаційну систему об'єктів лісового фонду різного рангу (як у вигляді певної сукупності таксаційних виділів та кварталів, так і усієї території лісового фонду лісництва або постійних лісокористувачів).

Ключові слова: геоінформаційна система; лісовий фонд; геопросторові дані; база даних; цифровізація.

Як цитувати: Роман Василь, Карабінюк Микола, Мигаль Андрій, Кічура Анастасія, Чепур Світлана (2025). Локальна геоінформаційна система земель лісового фонду: методичні особливості створення, практичні аспекти та перспективи використання. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (62), 324-336. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-24>

In cites: Roman Vasyly, Karabiniuk Mykola, Mihaly Andriy, Kichura Anastasia, Chepur Svitlana (2025). Local geographic information system of forestry lands: methodological features of creation, practical aspects and prospects of use. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (62), 324-336. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-24> [in Ukrainian]

Постановка проблеми. На сьогодні геоінформаційні системи (ГІС) та технології відіграють важливу роль у суспільстві та забезпечують виробничі потреби у різних сферах людської діяльності. Вони широко використовуються не тільки в освітній та науковій діяльності, але й впроваджуються для оптимізації комунікаційних систем, ефективного природокористування, моніторингу небезпечних процесів та охорони довкілля тощо [1-4]. В Україні та світі попит на інформаційні та

геоінформаційні системи постійно зростає через їх практичність та ефективність, які є найбільш затребуваними у різних виробничих галузях. Застосування сучасних геоінформаційних систем різного класу у поєднанні з просторовими даними дозволяє вирішувати низку важливих питань експлуатації та збереження природних ресурсів, зокрема – земельних та лісових [2].

Стрімкий розвиток геоінформаційних технологій та активне їх впровадження у виробничі

процеси також є каталізаторами для пошуку ефективних методів та засобів навчання майбутніх фахівців. Наразі активно розробляються ефективні навчальні програми щодо оволодіння здобувачами вищої освіти нових геоінформаційних технологій та підходів у різних сферах природокористування [4]. Також на сьогодні виникла потреба у покращенні фахових вмінь та навичок використання інструментальних геоінформаційних систем, що сприяє підвищенню якості та результативності наукових досліджень природничого та виробничого напрямків.

Метою статті є розробка алгоритму створення функціональної геоінформаційної системи на прикладі земель лісового фонду на основі якісного опрацювання вихідних картографічних матеріалів та структуризації (консолідація) атрибутивних даних. Важливим елементом дослідження є окреслення оптимальних способів формування атрибутивної інформації та шару просторових даних з вихідних джерел в цифровий формат із визначенням просторової прив'язки у спеціалізованому програмному середовищі QGIS. Основним результатом дослідження є створення локальної геоінформаційної системи на прикладі об'єктів лісового фонду Закарпатської області, функціонал та атрибутивна інформація якої визначає перспективність її використання для потреб освітян, науковців, практиків та інших зацікавлених сторін. Для цього необхідним є забезпечення формування атрибутивних даних із доступним форматом та логічною структурою, що буде сприяти оптимальному обміну інформації між суб'єктами лісової галузі в сфері лісочористування та управління, освітніми закладами та ін.

Аналіз останніх джерел та публікацій. Ефективна інструментальна основа та функціональні можливості сучасних геоінформаційних технологій головно забезпечують різноманіття сфер їх застосування. На сьогодні структуризація геопросторових даних у програмних геоінформаційних середовищах та формування функціональних спеціалізованих інформаційних систем головно сприяють ефективному управлінню землями лісового фонду [5-9] та запровадженню прогресивних ландшафтних підходів для оптимізації функціонального зонування природоохоронних територій [10]. Сучасні інструменти ГІС також активно використовують при реалізації різних геоботанічних та флористичних досліджень [11], для аналізу просторової диференціації геоекологічних загроз та вивчення сучасного стану природних (антропогенних) ландшафтів [12] тощо. Загальна цифровізація освітнього процесу та добре виражена виробнича потреба обумовили інтенсивне впровадження різноманітних елементів ГІС у навчальні плани різних спеціальностей у вищих

навчальних закладах, освоєння яких передбачає формування відповідних фахових компетентностей та забезпечує подальші кадрові ресурси держави [13, 14].

Загалом, дискусії українських дослідників більше стосуються ідей щодо впровадження таких технологій у різноманітні сфери пов'язані з природокористуванням [15]. Однак, ефективних методик та методологічних підходів щодо створення функціональних та затребуваних для освіти, науки і практики цілісних локальних геоінформаційних систем, що стосуються територій лісгосподарського призначення, відсутні. У науковій літературі зустрічаються повідомлення, щодо уже розроблених функціональних геоінформаційних систем, платформ та інструментів для роботи із землями лісового фонду України, зокрема:

- ГІС «Ліспроект» – геоінформаційна система національного рівня розроблена для Українського державного проектного лісовпорядного виробничого об'єднання (ВО «УКР-ДЕРЖЛІСПРОЕКТ») і призначена здійснювати планово-картографічний супровід ведення лісовпорядкування [16-18];
- SmallForest – мобільний додаток, який має широкий застосунок для різних потреб лісового господарства, в тому числі – адаптований для супроводу проведення Національної інвентаризації лісів [19];
- Геопортал «Ліси України» – веб ресурс, призначений для надання інформації про ліси України на основі двох рівнів доступу: загально публічного (доступна інформація про поточні рубки й карта об'єктів рекреації та відпочинку); спеціалізованого для працівників лісового господарства (функціонують різноманітні сервіси щодо ведення лісового господарства) [20];
- Геоінформаційна продукція Державного підприємства «Лісгосподарський інформаційно-аналітичний центр» (ДП «ЛІАЦ»), яке забезпечує лісову галузь різноманітними інформаційними системами, в тому числі й геоінформаційними (реєстр лісорубних квитків, лісові пожежі) [21].

Вище названі платформи та ресурси вирізняються інформативною функцією та суттєвою обмеженістю в доступі для загальних користувачів. Також на сьогодні є недоступним функції експорту інформації та геопросторових даних про землі лісового фонду, незважаючи на їх високий потенціал за умови відкритого доступу. Тому поєднання просторових даних з іншими відкритими даними (супутникові знімки, бази з інформацією про біорізноманіття та ін.) дозволить вирішувати низку завдань не лише в лісгосподарському

виробництві (розробка лісосировинної бази, проектування лісових доріг, моніторинг лісових насаджень, розробка ефективних проектів із охорони та захисту лісу тощо), а й у інших науково-прикладних галузях – заповідній справі, мисливському господарстві, ландшафтній екології та просторовому плануванні, флористиці тощо.

Аналіз сучасної літератури за тематикою свідчить про прогресивну практику впровадження сучасних геоінформаційних технологій у навчальний процес підготовки фахівців природничого напрямку, професійна кваліфікація яких вимагає вміння використовувати спеціалізоване програмне забезпечення для вирішення різних виробничих потреб. У змісті Стандартів вищої освіти із спеціальностей 205 Лісове господарство, 106 Географія, 101 Екологія, 193 Геодезія та землеустрій та ін. передбачено набуття здобувачами вищої освіти відповідних фахових компетентностей та результатів навчання, що стосуються отримання знань обробки геопросторових даних та вмінь роботи з інструментами геоінформаційного середовища [22]. Тому існує потреба в розширенні та обґрунтуванні нових методичних підходів до впровадження ГІС у програми підготовки фахівців різних спеціальностей головно природничих напрямків [13].

Матеріал і методи досліджень. У роботі використано загальноновизнані методи та підходи, що застосовуються в геоінформатиці та науках про дані [23-26]. При створенні локальної ГІС об'єктів лісового фонду основним програмним забезпеченням слугували:

- QGIS – для обробки та формування просторових даних;
- MS «Access», MS «Excel» – для структуризації атрибутивних даних;
- AdobePhotoshop – для обробки растрових зображень.

В якості основних вихідних даних для нашого дослідження та створення локальної ГІС використано дані інвентаризації лісів та відповідні картографічні матеріали (у масштабі 1:25 000) території Загатського лісництва філії «Довжанське лісомисливське господарство» державного підприємства «Ліси України» [27].

Паперові картографічні матеріали відцифровано за допомогою планшетного сканера Mustek 1200 у формат A3 при заданому розширенні 600 DPI та сканера Canon у форматі A4 у заданому розширенні 600 DPI. Файли сканування растрових зображень були збережені у форматі .tiff. Враховуючи можливості використовуваних сканерів, які не дозволяють одним скануванням захопити всю площину картографічних матеріалів досліджуваних ділянок, сканування виконували для окремих частин планів, які у подальшому обріза-

ли та з'єднували в єдине зображення за допомогою програмного забезпечення AdobePhotoshop.

Просторову прив'язку отриманих зображень здійснювали у програмному середовищі QGIS із використанням інструменту «Georeferencer», методичні особливості використання якого викладені в офіційній документації [28]. Прив'язку виконували у проекції ESPG: 3857- WGS 84 / Pseudo-Mercator. Основою для прив'язки слугували супутникові знімки Sentinel 2a (високої роздільної здатності – 15 м) та відкриті дані OpenStreetMap (OSM). У залежності від рельєфу місцевості використовували тип перетворення «Lienae» або «Polinomial 1», а також метод перетворення – «Nearest Neighbour».

Атрибутивну інформацію, отриману із таксаційних описів, формували у окремій таблиці за допомогою системи керування базами даних (СКБД) MS Access, яку в подальшому експортували у вигляді електронної таблиці MS Excel та завантажували в QGIS. Для подальшого з'єднання векторного шару оцифрованих таксаційних виділів з атрибутивними таблицями, для яких було розраховано первинні ключі за допомогою «Open field calculator» використовуючи апробовану формулу [29]:

- для виділів у межах лісгосподарського підприємства:

$$K_{ay} = (LG \cdot 1000000) + (LIS \cdot 100000) + (KV \cdot 1000) + VD, \quad (1)$$

- для виділів у межах лісництва:

$$K_{ay} = (KV \cdot 1000) + VD, \quad (2)$$

де: K_{ay} – первинний ключ; LG – поле, що містить шифр лісгосподарського підприємства; LIS – поле номера лісництва у структурі лісгосподарського підприємства; KV – поле з номером кварталу; VD – поле з номером виділу.

За допомогою того ж таки «Open field calculator» обчислювали площу векторного шару. Для розрахунку первинного ключа – формулу (1, 2) вводили у відповідне поле програмування, а для розрахунку площі виділів використано алгоритм *\$area* (з переведенням у гектари). Об'єднання векторного шару з таблицею атрибутів виконано за допомогою алгоритму «Manage joins to other layers» за спільним полем «CodeID».

Виклад основного матеріалу досліджень. Наразі найбільш повна і актуальна інформація про вкриті та неvkриті лісом землі лісового фонду України міститься у матеріалах лісовпорядкування. У зведеному вигляді ця інформація відображається у «Проектах організації території...» та Державному лісовому кадастрі постійних лісокористувачів. Згідно чинних нормативів [30], всебічна інформація про стан та основні показники

земель лісового фонду містяться у таксаційних описах, а просторове розміщення окремих ділянок лісового фонду відображено на планах лісонасаджень. Як правило, ця інформація у електронному вигляді практично відсутня у відкритому доступі, і для отримання цієї інформації необхідно звертатись безпосередньо до лісокористувача. Водночас матеріали, які можна отримати за запитом, здебільшого зберігаються на паперо-

вих носіях, таким чином, для забезпечення зручності користування цими матеріалами, виникає гостра потреба в їх цифровізації.

Пропонований нами алгоритм (рис. 1) дозволяє досить ефективно реалізовувати роботу зі створення локальних геоінформаційних систем об'єктів лісового фонду та використовувати їх у наукових, освітніх та виробничих цілях.

Отже суть процесу зі створення ГІС полягає



Рис. 1. Етапи створення локальної ГІС земель лісового фонду /

Fig. 1. Stages of creating a local GIS of forestry objects

у послідовному виконанні таких етапів:

- отримання вихідних даних, шляхом запити необхідних картографічних матеріалів у лісокористувача або завантаження планів лісових насаджень із офіційного сайту ВО «Укрдержліс-проект»;

- підготовка картографічних матеріалів (вихідних даних), яка передбачає сканування картографічних матеріалів з подальшою обробкою отриманих зображень;

- просторова прив'язка картографічних матеріалів;

- векторизація (оцифрування) просторово прив'язаних картографічних матеріалів, що передбачає створення векторних шарів меж лісництва, таксаційних кварталів та виділів;

- робота з атрибутами (полягає у автономному формуванні атрибутивних даних для векторних шарів, за допомогою електронних таблиць або СКБД);

- об'єднання просторових та атрибутивних даних, містить розрахунки первинних ключів для атрибутів векторних шарів та підготовленої таблиці з атрибутами, за допомогою яких виконується їх об'єднання;

- Перевірка функціональності створеної ГІС.

Підготовка просторових даних. Першочерговою дією є географічна прив'язка планів лісо-насаджень досліджуваного лісництва. Найкраще і зручніше виконувати таку прив'язку до публічної кадастрової карти України, оскільки на ній точно відтворені загальноприйняті межі користувачів для земель лісгосподарського призначення. Наразі доступ до Публічної кадастрової карти України є обмеженим, тому слід шукати альтернативні шляхи для виконання цієї задачі. Рекомендується виконувати прив'язку картографічних матеріалів до супутникових знімків середньої роздільної здатності (10 і більше м), таких як Sentinel 2a або використовувати відкрите джерело геоданих OpenStreetMap (OSM).

Прив'язку картографічних матеріалів, на нашу думку, найбільш зручно виконувати в ПЗ QGIS, а відповідні дії виконуються за допомогою інструменту «Georeferencer». Перед виконанням прив'язки здійснюються налаштування типу та методу перетворення вихідного растрового зображення. Рекомендується використовувати тип перетворення «Nearest neighbour» та метод «Polynomial 1» або «Linear» у проекції ESPG:

3857 - WGS 84 / Pseudo-Mercator. Для виконання прив'язки вихідного зображення визначаються контрольні точки, що відповідають координатам основи прив'язки і в процесі перетворення присвоюються растру вихідного зображення. Кількість контрольних точок, залежать від вибраного типу перетворення і при використанні типу поліном 1-го порядку визначаються як мінімум 5 контрольних точок, а при лінійній – мінімум 3. При прокладанні контрольних точок рекомендується використовувати спосіб внесення координат «In map canvas».

Процес визначення контрольних точок полягає у пошуку спільних ознак (місць) між вихідним зображенням та основою прив'язки. Це є досить трудомісткий і затратний процес, який залежить від багатьох чинників, але насамперед від особливостей лісового фонду досліджуваного лісництва, а також якості основи прив'язки. Основними об'єктами на території лісового фонду, на які слід орієнтуватись при прокладанні контрольних точок є зруби, ділянки лісових культур та лінійні об'єкти: лісові просіки, лісові дороги, лінії електропередач, річки тощо. Роздільна здатність супутникових знімків або зображення від OSM дозволяє добре розпізнати такі об'єкти. Якщо основою прив'язки є супутниковий знімок, краще використовувати зображення, виконане у осінньо-зимовий період, коли крізь крони дерев проглядаються орієнтовні місця прив'язки. При виконанні прив'язки до OSM орієнтування розміщення контрольних точок виконується по межах шару «Ліси», або «Гідрографія». Приклад проставлення контрольних точок наведено на рис. 2.

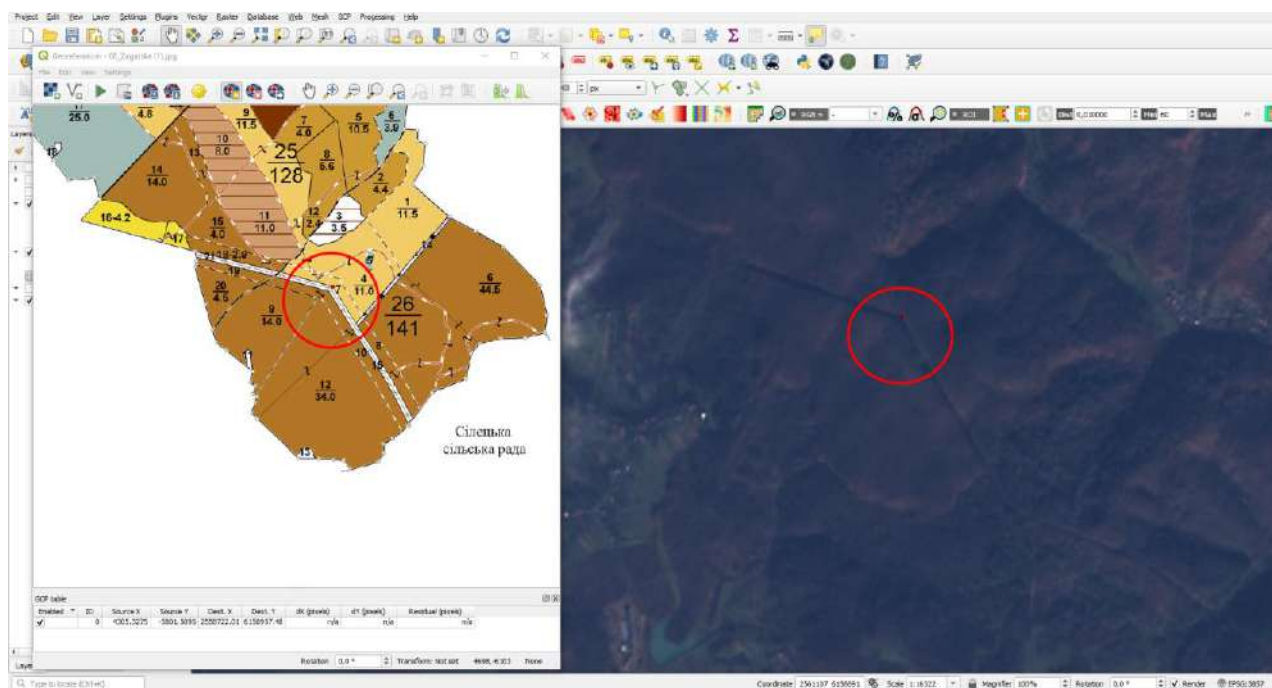
Після завершення процесу прив'язки, досліджуваний план «накладається» на основу. На цьому етапі обов'язково здійснюється оцінка результатів прив'язки, тобто, наскільки точно межі лісництва та кварталів співпадають з контурами основи прив'язки (найкраще перевірка виконується відносно супутникового знімку або карт Google Satellite Hybride). Якщо результат прив'язки є незадовільним, орієнтуючись на вже прив'язане зображення, підбираються більш оптимальне розміщення контрольних точок. Такий алгоритм повторюється то того моменту, коли межі лісництва будуть максимально відповідати основі прив'язки і середня похибка буде мінімальною.

Наступним кроком є оцифрування меж лісництва, його кварталів та виділів. Для цього створюються окремі шейп-шари полігонального типу для лісництва (Forestry), кварталів (Kvartal), виділів (Vydil) з такими полями атрибутів: для лісництва – шифр лісгоспу, назва лісгоспу, номер лісництва, назва лісництва; для кварталу – шифр лісгоспу, назва лісгоспу, номер лісництва, назва ліс-

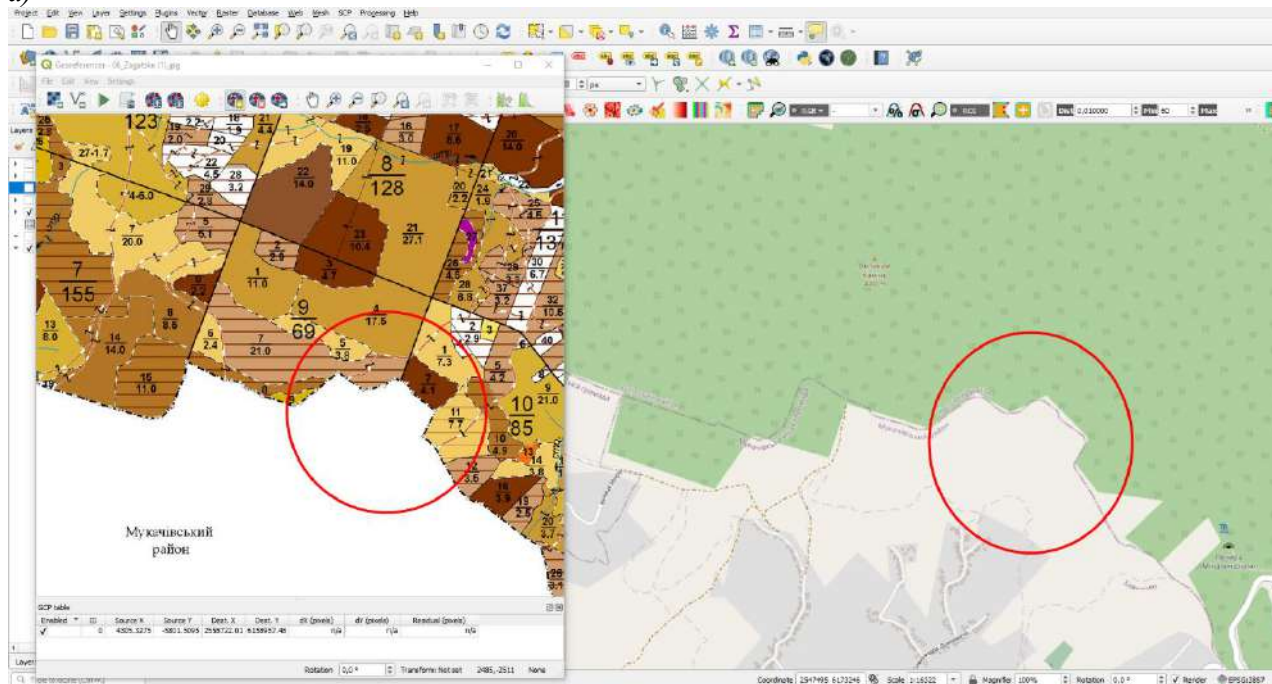
ництва, номер кварталу, категорія земель, категорія лісів; для виділу – номер кварталу, номер виділу. Далі слідує сам процес оцифрування об'єктів з плану лісонасаджень (наприклад, меж таксаційного виділу), який полягає у ручному обведенні меж лісництва, кварталів та виділів. Для забезпечення якісної оцифровки додатково використовується інструмент «Snapping Toolbar». Слід зауважити, що черговість оцифрування завжди повинна відповідати принципу «від більшого об'єкту до меншого» (лісництво → квартал → виділ). По завершенні операції з обведення меж для кожного оцифрованого виділу відразу вносяться атрибутивні дані про номер кварталу та виділу (рис. 3). Іншу атрибутивну інформацію бажано вносити в окремі таблиці і з'єднувати їх із атрибутами векторних шарів.

Підготовка атрибутивної інформації. Наступним етапом створення ГІС земель лісового фонду є підготовка атрибутивних даних. Це – найбільш важливий етап створення власної ГІС-лісів, котрий потребує від виконавця базових навичок роботи з базами даних. Оскільки при роботі з QGIS та ArcGIS зв'язування окремих таблиць атрибутів відбувається за одним полем, виникає потреба у створенні первинних ключів. Для створення такого ключа виконуються окремі розрахунки для окремого поля *CodeID* використовуючи формули (1, 2). Вихідні дані для розрахунків (номери кварталу та виділу) отримуються безпосередньо при оцифруванні планів лісонасаджень і вносяться як атрибути векторного шару. Деякі значення атрибутів на етапі структуризації (формування) даних створюються власноруч користувачем (такі як шифр лісгосподарського підприємства та номер лісництва у структурі лісового фонду лісгосподарського підприємства (або ПЛНДВ для ПЗФ)). Власне сам розрахунок первинних ключів виконуються вже на заключному етапі створення ГІС.

Підготовка і структуризація атрибутивної інформації може виконуватись за допомогою текстових і табличних редакторів, систем управління базами даних (СКБД) або безпосередньо у середовищі ГІС (одночасно із оцифруванням – після закінчення обведення меж таксаційних виділів). Якщо доступна повидільна база даних лісів, то здійснюється запит на вибірку потрібних параметрів лісових насаджень. На практиці, частіше використовують таксаційний опис лісництва, дані з якого вручну вносяться в окрему таблицю. Оскільки шари «Forestry» та «Kvartal» мають незначну кількість даних, їх атрибути вносяться відразу при оцифруванні, зокрема для шару «Forestry»: код лісгосподарського підприємства (постійного лісокористувача) (*CodeLG*) і його найменування (*NameLG*), номер лісництва в стру-



a)



b)

Рис. 2. Видгляд місць прив'язки на супутниковому знімку (а) та на мапі від OpenStreetMap (b) /
Fig. 2. View of the anchor points on satellite image (a) and on the OpenStreetMap map (b)

ктурі лісгоспу (*LIS*) та його назва (*NameLIS*); для шару «Kvartal»: ті ж дані, що й для шару «Forestry», а також поля з номером кварталу (*KV*) та категорія лісів (*cat_forest*). Шар «Vydil» має значно більшу кількість атрибутивної інформації та на початкових етапах створення буде складатися переважно із даних, що містяться у таксаційному описі. Таким чином, структура атрибутивних даних буде містити перелік стовпців, які наведені у таблиці 1.

Як зазначалось вище, джерелами атрибутив-

ної інформації при створенні ГІС є план лісонасаджень та таксаційний опис ділянок лісового фонду певного лісництва. Це вимагає при формуванні атрибутивних даних внесення потрібної інформації вручну. Найбільш ефективними, на нашу думку, способами внесення даних, а також формування їх у декількох окремих таблицях одночасно є – використання спеціалізованих «Форм» у СКБД Access. Конфігурації форм є досить різноманітними (щодо наявності та розміщення спеціалізованих кнопок переходів, навіга-

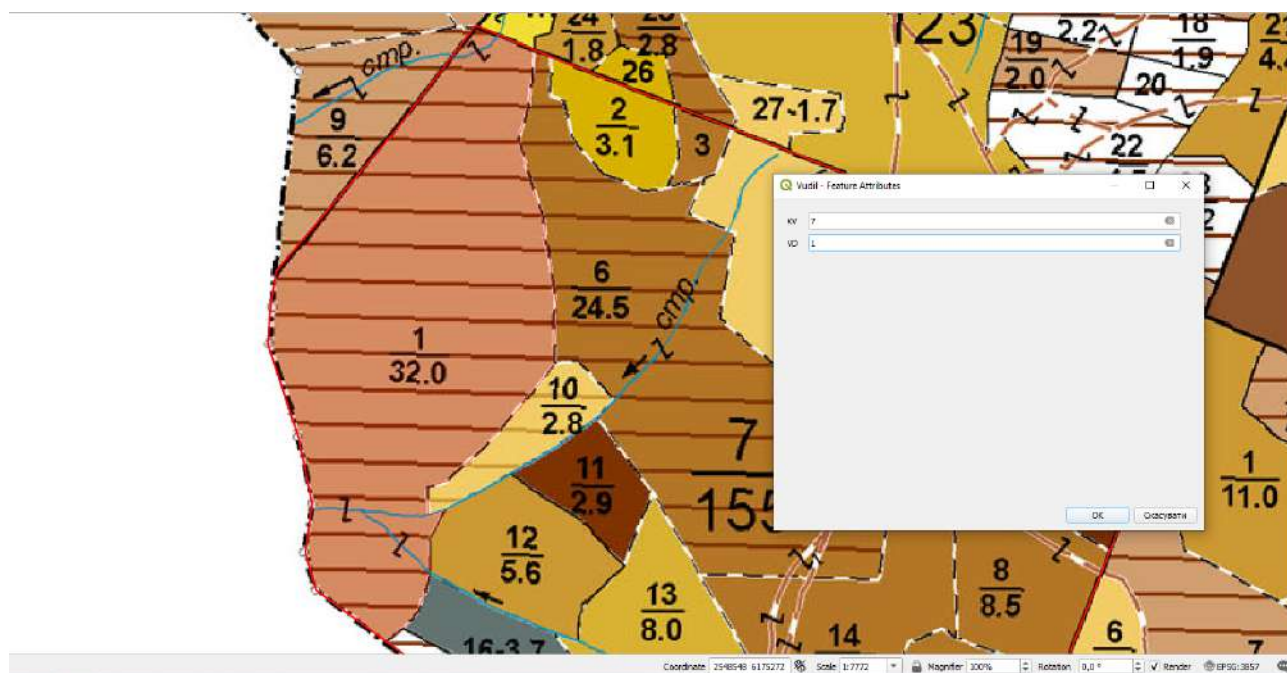


Рис 3. Оцифрування таксаційних виділів на плані лісових насаджень Загатського лісництва /
Fig. 3. Digitization of taxation allocations on the plan of forest plantations of Zahatske Forestry

ційної панелі, спадаючих списків тощо), тому користувач підбирає налаштування форми на власний розсуд. Варто зазначити, що форми для внесення повинні містити перелік стовпців згідно табл. 1 (рис. 4а), а приклад типової форми для внесення даних наведений на рис. 4б. Детально із особливостями створення форм у СКБД Access можна ознайомитися на офіційному сайті розробника.

Окрім згаданого вище способу, вносити дані також можна безпосередньо у середовищі QGIS або використовувати електронні таблиці MS Excel. Але, не зважаючи на обраний спосіб формування атрибутивних даних, найбільш важливим на цьому етапі є забезпечення реляційності таблиць з даними та атрибутами векторних шарів. Тому обов'язковою умовою є наявність у записах окремих таблиць даних щодо шифру лісгоспа (*CodeLG*), номера лісництва (*CodLIS*), номера кварталу (*KV*) та виділу (*VD*). Це дозволить розраховувати первинні ключі, а також з'єднувати таблиці між собою у СКБД.

На заключному етапі виконується приєднання таблиць з атрибутивними даними до векторних шарів. На цьому етапі здійснюється розрахунок первинних ключів у окремо створеному полі (*CodeID*) за допомогою інструменту «Open field calculator». Для цього у відповідному полі «Open field calculator» (рис. 5а) вводиться формула, де змінні величини відповідають окремим полям таблиці. Первинні ключі розраховуються як для векторних шарів, так і для таблиць з атрибутивними даними. Наступним кроком є приєднання таблиці з векторним шаром за допомогою

інструменту «Manage joins to other layers» з використанням спільного поля *CodeID* (рис. 5б).

Перевірка функціональності. Після виконання всіх операцій зі створення ГІС, слідує перевірка її функціональності. Для прикладу, на основі отриманих даних нами створено тематичні карти щодо розподілу земель лісового фонду за переважаючими деревними видами (рис. 6а), типами лісу (рис. 6б) та за ступенями стійкості ґрунтів (рис. 6с).

Як бачимо, використовуючи створену геоінформаційну систему земель лісового фонду, створено різні за змістом тематичні карти лісів досліджуваного лісництва, які в сукупності є більш інформативними та практичними в порівнянні з планами лісонасаджень (вихідними даними). Для прикладу, ліси з переважанням у складі різних деревних видів, на планах лісонасаджень об'єднані в одну категорію (дуб скельний, дуб червоний, дуб звичайний) і відображаються одним кольором на карті, що на практиці може створювати певні труднощі, наприклад, при вивченні поширення видів деревних рослин. Використання створеної ГІС дозволяє не лише уникнути цієї проблеми, але й створювати нові картографічні матеріали.

Висновки. Пропонований алгоритм створення локальної геоінформаційної системи земель лісового фонду дає можливість отримувати повноцінну ГІС, яка має широкий перелік видів застосувань. Доступний набір просторових та атрибутивних даних, отриманий в ході створення ГІС дозволяє, насамперед, ефективно планувати та здійснювати наукові дослідження. Також даний інформаційний ресурс доцільно використовувати

Таблиця 1/ Table 1

Перелік атрибутів шару «Vydil» / List of attributes of the “Vydil” layer

№	Найменування	Назва поля	Тип даних у середовищі QGIS	Характеристика
1	CodeID	CodeID	Integer	Розрахований ідентифікатор (ключ) для окремого виділу
2	LG	LG	Integer	Створений шифр лісгосподарського підприємства (постійного лісокористувача)
3	NameLG	NameLG	Text	Назва постійного лісокористувача
4	LIS	LIS	Integer	Номер лісництва в структурі лісгоспу
5	NameLIS	NameLIS	Text	Назва лісництва
6	KV	KV	Integer	Номер кварталу
7	VD	VD	Integer	Номер виділу
8	Категорія земель	Cat_zem	Text	Назва категорії земель
9	Категорія лісів	Cat_lis	Text	Назва категорії земель
10	Площа	Area	Decimal number	Площа виділу, га
11	Розрахована площа	Real_area	Decimal number	Розрахована площа оцифрованого виділу, га
12	Склад деревостану	Sklad	Text	Перелік складових деревних видів у складі лісу з вказанням коефіцієнту їх часток
13	Ярус	Yarus	Integer	Порядковий номер ярусу
12	Елемент лісу (переважаюча порода)	Species	Text	Характеризує переважаючий деревний вид (породу) у складі деревостану
13	Вік	A	Integer	Середній вік переважаючої деревної породи (виду) в складі деревостану, років
14	Висота	H	Integer	Середня висота переважаючої деревної породи (виду) в складі деревостану, м
15	Діаметр	D	Integer	Середній діаметр переважаючої деревної породи (виду) в складі деревостану, см
16	Група віку	Class_age	Text	Категорія групи віку (молодняки, середньовікові)
17	Клас бонітету	Bonitet	Text	Клас бонітету
18	Тип лісу	Type_lis	Text	Індекс типу лісу
19	Відносна повнота	P	Decimal number	Числове значення від 0,0 до 1,0
20	Запас на 1 га	M	Decimal number	Кількість деревини на 1 га ($\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$)
21	Запас на виділі	M_vyd	Decimal number	Кількість деревини на всій площі виділу ($\text{тис.м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$)
22	% ділових стовбурів	TS	Integer	Частка стовбурів дерев, які за технічними характеристиками віднесені до ділових, %
23	Господарський захід	Gosp_zahid	Text	Найменування запроектованого на ревізійний період господарського заходу

Основна таблиця з атрибутами

Ім'я поля	Тип даних
CodeID	Велике число
LG	Число
NameLG	Довгий текст
LIS	Число
NameLIS	Короткий текст
KV	Число
VD	Число
Категорія земель	Короткий текст
Категорія лісів	Короткий текст
Площа	Короткий текст
Склад деревостану	Короткий текст
Ярус	Короткий текст
Елемент лісу (переважаюча г	Короткий текст
A	Число
H	Число
D	Число
Група віку	Короткий текст
Клас бонітету	Короткий текст
Тип лісу	Короткий текст
Відносна повнота	Короткий текст
Запас на 1 га	Число
Запас на виділі	Короткий текст

a)

Основна таблиця з атрибутами

CodeID		H		11
LG		D		12
NameLG		Група віку		Молодняки 2-го класу
LIS		Клас бонітету		Молодняки 1-го класу
NameLIS		Тип лісу		Молодняки 2-го класу
KV		Відносна повнота		Середньовікові
VD		Запас на 1 га		Пристиглі
Категорія земель		Запас на виділі		Стиглі
Категорія лісів		% ділових стовбурів		Перестиглі
Площа		Господарський захід		
Склад деревостану				
Ярус				
Елемент лісу				
A				

b)

Рис. 4. Видяг структури даних основної таблиці (a) та типової форми для введення даних (b) в MS Access / Fig. 4. View of the data structure of the main table (a) and a typical form for data entry (b) in MS Access

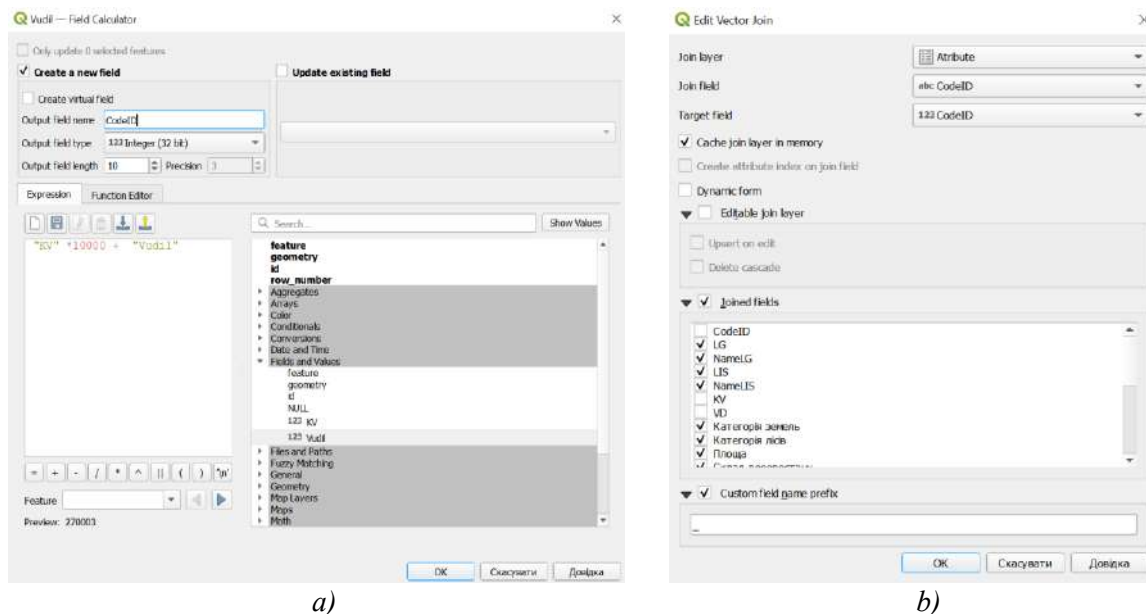


Рис. 5. Кінцеві операції зі створення ГІС: а – розрахунок первинного ключа; б – приєднання таблиці з атрибутами до векторного шару / Fig. 5. Final operations for creating a GIS: a – calculation of the primary key; b – joining a table with attributes to a vector layer

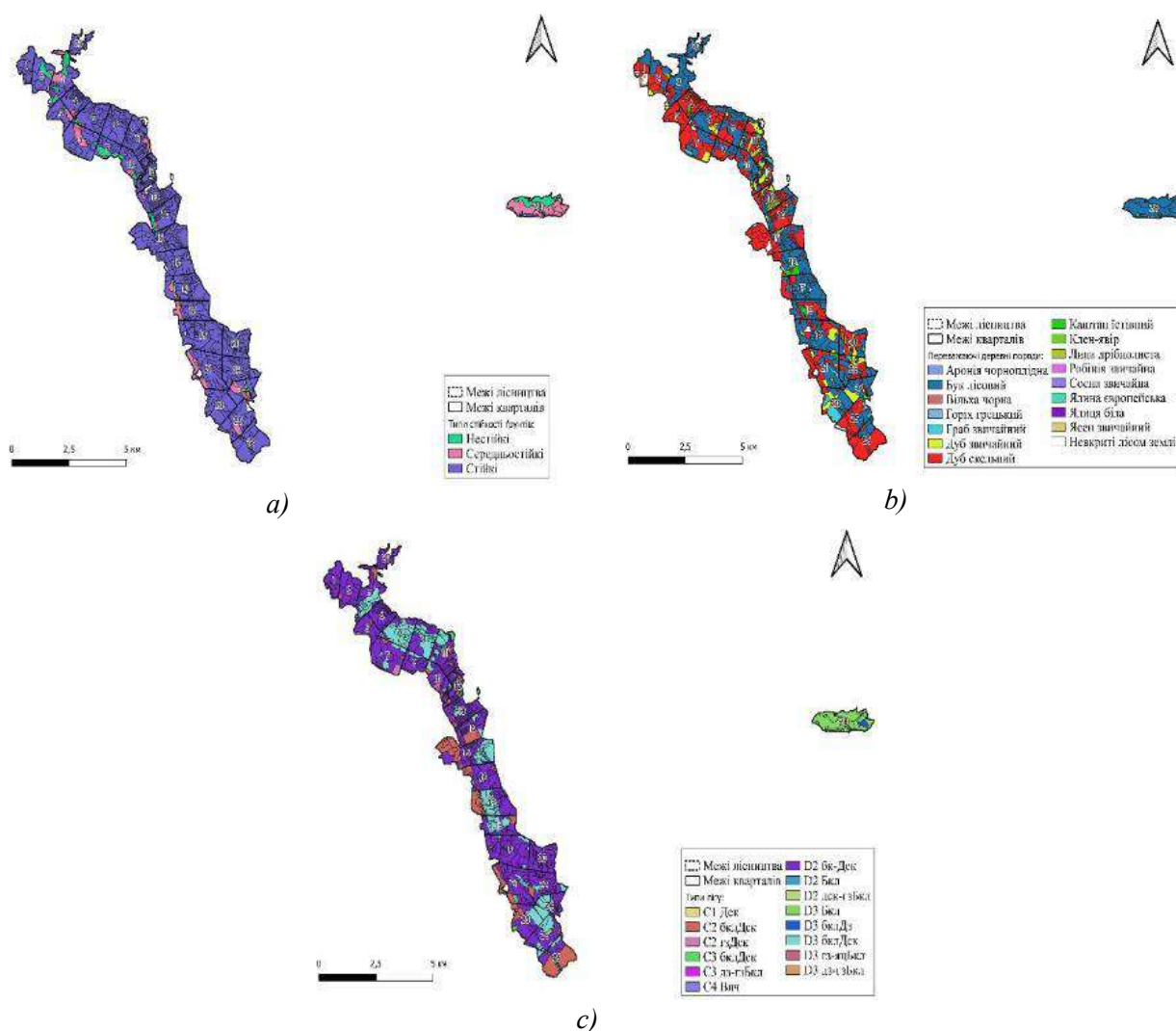


Рис. 6. Розподіл території Загаського лісництва за стійкістю ґрунтів (а), переважаючими породами (деревними видами) (б) та типами лісу (с) / Fig. 6. Distribution of the Zahatske Forestry territory by soil stability (a), predominant species (tree species) (b) and forest types (c)

при здійсненні громадського контролю щодо ведення лісового господарства, а постійному лісокористувачу – полегшує роботу з проектування і виконання лісгосподарських заходів. Можливим недоліком представленого алгоритму є відсутність автоматизації процесів оцифрування планів лісонасаджень.

Отже, на основі доступних даних із використання відкритого і відносно дешевого програмного забезпечення є можливість створювати досить цінну в науковому та виробничому аспектах геоінформаційну систему, а запропонований нами алгоритм створення є нескладний у реалізації та доступний усім зацікавленим сторонам.

Список використаних джерел

1. Frigerio, I., Ventura, S., Strigaro, D., Mattavelli, M., De Amicis, M., Mugnano, S., & Boffi, M. (2016). A GIS-based approach to identify the spatial variability of social vulnerability to seismic hazard in Italy. *Applied Geography*, 74, 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.06.014>
2. Halder, B., Karimi, A., Mohammad, P., Bandyopadhyay, J., Brown, R. D. & Yaseen, Z. M. (2022). Investigating the relationship between land alteration and the urban heat island of Seville city using multi-temporal Landsat data. *Theoretical and Applied Climatology*. 150(1), 613–635. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04180-8>
3. Karabiniuk, M., Kalynych, I., Leta, V., Mykyta, M. & Melnychuk, V. (2022). Geological conditions of development and landscape differentiation of modern geological and geomorphological processes in the highlands of the Chornohora massif (Ukrainian Carpathians), *Geodynamics*. Vol. 1(32), 64–79. doi: <https://doi.org/10.23939/jgd2022.02.064>
4. Wang, Y., Zhang, Y., Yang, G., Cheng, X., Wang, J., & Xu, B. (2022). Knowledge Mapping Analysis of the Study of Rural Landscape Ecosystem Services. *Buildings*, 12(10), 1517. <https://doi.org/10.3390/buildings12101517>
5. Коржов, В., & Часковський, О. (2018). Методологічні аспекти створення геоінформаційної системи лісових автодоріг. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*, (14), 259–264. <https://doi.org/10.15421/411635>
6. Gabriele, G. & Ingrid, V. (2018). GIS Instruments in Support of the Forestry Activities: A Case Study. *Journal of Agricultural Science and Technology B*, 8(6), 388–395. <https://doi.org/10.17265/2161-6264/2018.06.006>
7. Gregory, B. & Pat, R. (2009). Public Participation GIS: A New Method for Use in National Forest Planning. *Forest Science*, Vol. 55 (2), 166–182. <https://doi.org/10.1093/forestscience/55.2.166>
8. SH, S. (2015). Application of Geographic Information System (GIS) in Forest Management. *Journal of Geography & Natural Disasters*, 05(03), 145. doi: <https://doi.org/10.4172/2167-0587.1000145>
9. Latterini, F., Stefanoni, W., Venanzi, R., Tocci, D., & Picchio, R. (2022). GIS-AHP Approach in Forest Logging Planning to Apply Sustainable Forest Operations. *Forests*, 13(3), 484. <https://doi.org/10.3390/f13030484>
10. Hostiuk, Z. V., Buriannyk, O. O., & Karabiniuk, M. M. (2022). Landscape Principles of Optimization of Functional Zoning of «Hutsulshchyna» National Nature Park. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 31(3), 450–459. <https://doi.org/10.15421/112241>
11. Viztra, G. V., Frei, K., Hábcenyus, A. A., Soóky, A., Batori, Z., Laborczy, A., Csikós, N., Szatmári, G., & Szilassi, P. (2023). Applicability of Point- and Polygon-Based Vegetation Monitoring Data to Identify Soil, Hydrological and Climatic Driving Forces of Biological Invasions—A Case Study of *Ailanthus altissima*, *Elaeagnus angustifolia* and *Robinia pseudoacacia*. *Plants*, 12(4), 855. <https://doi.org/10.3390/plants12040855>
12. Melnyk, A., Grodzynskyi, M., Obodovskiy, O., Kostiv, L., Karabiniuk, M., & Prytula, R. (2019). Altitudinal differentiation of snow cover in the north-eastern sector of Chornohora massive in Ukrainian Carpathians. *Proceedings of the international conference of computational methods in sciences and engineering 2019 (ICCMSE-2019)*. AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/1.5138049>
13. Leta, V. V., Karabiniuk, M. M., Mykyta, M. M., & Kachailo, M. M. (2023). Use of geoinformation technologies in distance learning of future specialists in geography. *Information Technologies and Learning Tools*, 95(3), 112–123. <https://doi.org/10.33407/itlt.v95i3.5104>
14. Zápotocký, M. & Koreň, M. (2022). Multipurpose GIS Portal for Forest Management, Research, and Education., *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(7):405. <https://doi.org/10.3390/ijgi11070405>
15. Часковський, О., Андрейчук, Ю. & Ямелинець, Т. (2021). Застосування ГІС у природоохоронній справі на прикладі відкритої програми QGIS. *Простір-М*.
16. Білецький, Б. О., Литвинов, В. А., Беспалов, В. П., Майстренко, С. Ю., Загребя, Т. О. & Хуртислава, К. В. (2013). Практичне застосування ГІС-технологій для планово-картографічного супроводження лісовпорядкування (на прикладі «ГІС – лісprojekt»). *Математичні машини і системи*, 3, 76–86.
17. Білецький, Б.О. & Беспалов, В.П. (2009). Деякі аспекти використання засобів ГІС для автоматизації процесу оброблення картографічної інформації лісовпорядкування. *Системи підтримки прийняття рішень. Системи підтримки прийняття рішень. Теорія і практика*, Київ, 90 –93.
18. Майстренко, І. Я. (2015). Система «ГІС-лісprojekt» як прототип геоінформаційної складової кадастрової системи. *Математичні машини і системи*, 3, 93–99.
19. Aleksiiuk, I., Hrynyk, H., Dyak, T., Hrynyk, O. & Zadorozhnyy, A. (2023). SmallForest mobile app: availability, functionality and use. *Sylwan*, 167(6), 384–396, DOI: <https://doi.org/10.26202/sylwan.2023038>
20. Геопортал “Ліси України”. (2024). <https://forestry.org.ua/>
21. Державне підприємство «Лісгосподарський інформаційно-аналітичний центр» (ЛІАЦ) (2024). <https://www.ukrforest.com/>

22. Міністерство освіти і науки України (2024). Затверджені стандарти вищої освіти. Міністерство освіти і науки України. <https://mon.gov.ua/osvita-2/vishcha-osvita-ta-osvita-doroslikh/naukovo-metodichna-rada-ministerstva-osviti-i-nauki-ukraini/zatverdzeni-standarti-vishchoi-osviti>
23. Зацерковний, В. І., Бурачек, В. Г., Железняк, О. О. & Терещенко, А. О. (2014). Геоінформаційні системи і бази даних. НДУ ім. М. Гоголя, 1, 492.
24. Awange, J. L., & Kyalo Kiema, J. B. (2013). *Environmental Geoinformatics*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-34085-7>
25. *Geographic Information Systems - Data Science Approach*. IntechOpen. doi: <https://doi.org/10.5772/intechopen.111053>
26. Karimi, H.A. (2009). *Handbook of Research on Geoinformatics*. Pittsburgh, USA: Information Science Reference
27. Державне агентство лісових ресурсів України (2024). Публічна інформація. <https://forest.gov.ua/agentstvo-publiczna-informaciia>
28. QGIS Documentations. QGIS User Guide. (2024). https://docs.qgis.org/3.34/en/docs/user_manual/index.html
29. Mihaly, A., V. Roman. 2024. Application of a spatial dataset for monitoring invasive woody plant species in the forests of Transcarpathia, Ukraine. *GEO&BIO*, 26: 135–144.
30. Про затвердження Порядку здійснення лісовпорядкування, Постанова Кабінету Міністрів України № 112 (2023) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/112-2023-n#Text>

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Local geographic information system of forestry lands: methodological features of creation, practical aspects and prospects of use

Vasyl Roman¹

Lecturer of the Department of Forestry,

¹ Uzhhorod National University, Uzhhorod, Ukraine;

Mykola Karabiniuk¹

PhD of Geographical Science

Associate Professor of the Department of Physical Geography
and Efficient Environmental Management;

Andriy Mihaly¹

PhD (Biology), Associate Professor of the Department of Forestry;

Anastasia Kichura¹

PhD (Agricultural), Associate Professor of the Department of Forestry;

Svitlana Chepur¹

PhD (Agricultural), Associate Professor of the Department of Forestry

ABSTRACT

Stating the Subject of the Study. The development of geoinformation systems as one of the elements of sustainable development in nature management, in particular when using forest resources, is especially relevant today. This is due to the fact that forests are the most balanced ecosystems that perform various beneficial functions for humans, and are one of the main sources of renewable energy. The introduction of GIS in nature management, especially in the field of forestry, allows to achieve key goals of sustainable development, and crucial is the development of methods for improving existing or creating new GIS is crucial. The use of modern geoinformation systems of different classes will allow to solve a number of important issues of operation and conservation of natural resources, in particular - land and forest.

The study aims. The aim of the article is to develop an algorithm for the creation of a functional geoinformation system on the example of forest funds on the basis of quality processing of source cartographic materials and structuring (consolidation) of attributive data

Methodology and materials. In the study are used generally recognized methods and approaches generally used in geoinformatics and data sciences. Initial data for the creation of GIS are the plans of forestry and taxation descriptions of forestry that were processed with the most famous software products: QGIS, MS Excel, MS Access, AdobePhotoshop.

Study results. The study describes the algorithm for the creation of GIS lands of the forest fund, which consists of the following basic stages: obtaining initial data, digitalization and spatial attachment of cartographic materials, formation of tables with attributive data, combining spatial data with attributes, checking the functionality of the created GIS. The article pays significant attention to the features of attributive data formation and ways of their subsequent use in combination with vector layers. The algorithm presented makes it possible to create a full-fledged GIS of the forest fund, the functionality of which allows to perform various tasks for the use of forest resources, in particular when planning and organizing forestry, as well as providing support for scientific research.

Scientific novelty and practical significance. Representation of effective methodology and methodological approaches to the creation of functional local geoinformation systems that take into account the specifics of forest land is carried out for the first time. The proposed algorithm for the creation of a local geoinformation system of forest funds makes it possible to receive a complete GIS, which has a wide list of types of applications: from planning and organization of economic activity to use in the educational and scientific fields.

Keywords: geographic information system; forests; geospatial data, database, digitization.

References

1. Frigerio, I., Ventura, S., Strigaro, D., Mattavelli, M., De Amicis, M., Mugnano, S., & Boffi, M. (2016). A GIS-based approach to identify the spatial variability of social vulnerability to seismic hazard in Italy. *Applied Geography*, 74, 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.06.014>
2. Halder, B., Karimi, A., Mohammad, P., Bandyopadhyay, J., Brown, R. D. & Yaseen, Z. M. (2022). Investigating the relationship between land alteration and the urban heat island of Seville city using multi-temporal Landsat data. *Theoretical and Applied Climatology*. 150(1), 613–635. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04180-8>
3. Karabiniuk, M., Kalynych, I., Leta, V., Mykyta, M. & Melnychuk, V. (2022). Geological conditions of development and landscape differentiation of modern geological and geomorphological processes in the highlands of the Chornohora massif (Ukrainian Carpathians), *Geodynamics*. 1(32), 64–79. <https://doi.org/10.23939/jgd2022.02.064>
4. Wang, Y., Zhang, Y., Yang, G., Cheng, X., Wang, J., & Xu, B. (2022). Knowledge Mapping Analysis of the Study of Rural Landscape Ecosystem Services. *Buildings*, 12(10), 1517. <https://doi.org/10.3390/buildings12101517>
5. Korzhov, V., & Chaskovskyy, O. (2018). Methodological aspects of geoinformation system development for forest roads. *Scientific Works of the Forestry Acad. of Sciences of Ukraine*, (14), 259–264. <https://doi.org/10.15421/411635> [in Ukrainian]
6. Gabriele, G. & Ingrid, V. (2018). GIS Instruments in Support of the Forestry Activities: A Case Study. *Journal of Agricultural Science and Technology B*, 8(6), 388–395. <https://doi.org/10.17265/2161-6264/2018.06.006>
7. Gregory, B. & Pat, R. (2009). Public Participation GIS: A New Method for Use in National Forest Planning. *Forest Science*, 55 (2), 166–182. <https://doi.org/10.1093/forestscience/55.2.166>
8. SH, S. (2015). Application of Geographic Information System (GIS) in Forest Management. *Journal of Geography & Natural Disasters*, 05(03), 145. <https://doi.org/10.4172/2167-0587.1000145>
9. Latterini, F., Stefanoni, W., Venanzi, R., Tocci, D., & Picchio, R. (2022). GIS-AHP Approach in Forest Logging Planning to Apply Sustainable Forest Operations. *Forests*, 13(3), 484. <https://doi.org/10.3390/f13030484>
10. Hostiuk, Z. V., Buriyanyk, O. O., & Karabiniuk, M. M. (2022). Landscape Principles of Optimization of Functional Zoning of «Hutsulshchyna» National Nature Park. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 31(3), 450–459. <https://doi.org/10.15421/112241>
11. Viztra, G. V., Frei, K., Hábenczyus, A. A., Soóky, A., Bátori, Z., Laborczy, A., Csikós, N., Szatmári, G., & Szilassi, P. (2023). Applicability of Point- and Polygon-Based Vegetation Monitoring Data to Identify Soil, Hydrological and Climatic Driving Forces of Biological Invasions—A Case Study of *Ailanthus altissima*, *Elaeagnus angustifolia* and *Robinia pseudoacacia*. *Plants*, 12(4), 855. <https://doi.org/10.3390/plants12040855>
12. Melnyk, A., Grodzynskiy, M., Obodovskiy, O., Kostiv, L., Karabiniuk, M., & Prytula, R. (2019). Altitudinal differentiation of snow cover in the north-eastern sector of Chornohora massive in Ukrainian Carpathians. *Proceedings of the international conference of computational methods in sciences and engineering 2019 (ICCMSE-2019)*(0). AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/1.5138049>
13. Leta, V. V., Karabiniuk, M. M., Mykyta, M. M., & Kachailo, M. M. (2023). Use of geoinformation technologies in distance learning of future specialists in geography. *Information Technologies and Learning Tools*, 95(3), 112–123. <https://doi.org/10.33407/itlt.v95i3.5104>
14. Zápotocký, M. & Koreň, M. (2022). Multipurpose GIS Portal for Forest Management, Research, and Education., *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(7): 405. <https://doi.org/10.3390/ijgi11070405>
15. Chaskovskiy, O., Andreichuk, Yu. & Yamelynets, T. (2021). Application of GIS in environmental protection on the example of the open source program QGIS. *Prostir-M*, 2021. [in Ukrainian]
16. Biletskyi, B. O., Lytyynov, V. A., Bepalov, V. P., Maistrenko, S. Ya., Zahreba, T. O. & Khurtsylava K. V. (2013). Practical application of GIS technologies for planning and mapping support of forest management (on the example of «GIS-lisproekt»). *Mathematical machines and systems*, 3, 76–86. [in Ukrainian]
17. Biletskyi, B.O. & Bepalov, V.P. (2009). Some aspects of using GIS tools to automate the process of processing cartographic information for forest management. *Biletskyi, on Scientific and practical conference with international participation. Decision support systems. Theory and practice*, Kyiv, 90–93. [in Ukrainian]
18. Maistrenko, S. Ya. (2015). The system “GIS-Lisproekt” as a prototype of geoinformation component of cadastral system. *Machines and mathematical systems*, 3, 93–99. [in Ukrainian]
19. Aleksiuk, I., Hrynyk, H., Dyak, T., Hrynyk, O. & Zadorozhnyy, A. (2023). SmallForest mobile app: availability, functionality and use. *Sylwan*, 167(6), 384–396. <https://doi.org/10.26202/sylwan.2023038>
20. Geoportal “Forests of Ukraine” (2024). <https://forestry.org.ua/> [in Ukrainian]
21. Derzhavne pidpriemstvo «State Enterprise “Forestry Information and Analytical Center”» (FIAC) (2024). <https://www.ukrforest.com/> [in Ukrainian]

22. Ministry of Education and Science of Ukraine (2024). Approved standards of higher education. Ministry of Education and Science of Ukraine. <https://mon.gov.ua/osvita-2/vishcha-osvita-ta-osvita-doroslikh/naukovo-metodichna-rada-ministerstva-osviti-i-nauki-ukraini/zatverdzeni-standarti-vishchoi-osviti> [in Ukrainian]
23. Zatserkovnyi, V. I., Burachek, V. H., Zhelezniak, O. O. & Tereshchenko, A. O. (2014). Geographic information systems and databases. NDU im. M. Hoholia. [in Ukrainian]
24. Awange, J. L., & Kyalo Kiema, J. B. (2013). *Environmental Geoinformatics*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-34085-7>
25. *Geographic Information Systems - Data Science Approach*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.111053>
26. Karimi, H.A. (2009). *Handbook of Research on Geoinformatics*. Pittsburgh, USA: Information Science Reference
27. State Agency of Forest Resources of Ukraine (2024). Public information. <https://forest.gov.ua/agentstvo/publicna-informaciia>
28. QGIS Documentations. QGIS User Guide (2024). https://docs.qgis.org/3.34/en/docs/user_manual/index.html
29. Mihaly, A., V. Roman. 2024. Application of a spatial dataset for monitoring invasive woody plant species in the forests of Transcarpathia, Ukraine. *GEO&BIO*, 26, 135–144. <https://doi.org/10.53452/gb2611> [in Ukrainian]
30. On Approval of the Procedure for Forest Management, Resolution of the CMU № 112 (2023) (Ukraine). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/112-2023-n#Text> [in Ukrainian]

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Received 4 March 2025

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Accepted 10 April 2025

Геоекологічна класифікація угідь за категоріями цінності для проживання ратичних (Artiodactyla): досвід із застосуванням ГІС-технологій

Юлія Сержантова¹

ст. викладач, кафедра фізичної географії та картографії,

¹ Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, Харків, Україна,

e-mail: y.serzhantova@karazin.ua,  <https://orcid.org/0009-0004-9896-3768>;

Наталія Брусенцова^{2,3}

к. біол. н., ст. наук. співробітник,

² Національний природний парк «Куяльницький», Одеса, Україна;

³ Національний природний парк «Слобожанський», Краснокутськ, Україна,

e-mail: n_brusentsova@ukr.net,  <https://orcid.org/0000-0002-1428-4855>;

Оксана Залюбовська¹

к. геогр. н., доцент кафедри фізичної географії та картографії,

e-mail: bodnia@karazin.ua,  <https://orcid.org/0000-0003-4195-9114>

Інвентаризація та класифікація угідь за категоріями цінності проживання різних видів є важливим етапом впорядкування території та планування проведення подальших досліджень та природоохоронних заходів, а також має на меті збереження відновлення, стале використання наземних екосистем та їхніх послуг, зокрема лісів, що відповідає 15-й Цілі сталого розвитку. Затвердженої методики бонітування природоохоронних територій з метою оцінки їхньої придатності для проживання видів тварин нині не існує. Якість умов існування покладено в основу методики оцінки оптимальної чисельності мисливських видів тварин у лісомисливських господарствах. У статті представлена ця методика, яка була адаптована під можливості сучасних ГІС-технологій, що дозволяють ефективно працювати з великими масивами даних, в тому числі матеріалами лісотаксації та лісовпорядкування, зберігати, структурувати дані та забезпечувати достатньо високий рівень автоматизації для здійснення подальшої оцінки (бонітування) та візуалізації умов проживання різних видів тварин. Розглянута можливість застосування ландшафтно-географічних методів та відповідних критеріїв оцінки потенціалу природних комплексів національного природного парку «Слобожанський» у відповідності до геоекологічних потреб ратичних тварин (Artiodactyla) на прикладі сарни європейської. Обробку та візуалізацію даних проводили у програмному пакеті QGIS. Результати представлені у вигляді розроблених баз даних для подальших досліджень та картографічно-аналітичних матеріалів для наочної візуалізації, зокрема шляхом створення тематичних карт та детального описового аналізу. Отримані картографічні матеріали можуть бути в подальшому використані для проведення робіт із збереження та відтворення тварин у національному природному парку «Слобожанський». Таку оцінку придатності територій та укладання тематичних картосхем можна здійснювати і для інших видів мисливських тварин, наведених у «Порядку проведення упорядкування мисливських угідь». Види тварин, які не належать до категорії «мисливських» потребують окремої розробки системи класифікації угідь за категоріями цінності. Оцінка цінності земель для проживання тварин на основі матеріалів лісовпорядкування може бути застосована до різних територій, включаючи заповідні території України.

Ключові слова: геоінформаційні системи (ГІС), ратичні, бонітування, придатність умов проживання, матеріали лісовпорядкування, лісотаксація, геоекологічна оцінка, збереження екосистем суходолу, національний природний парк, Україна.

Як цитувати: Сержантова Юлія, Брусенцова Наталія, Залюбовська Оксана (2025). Геоекологічна класифікація угідь за категоріями цінності для проживання ратичних (Artiodactyla): досвід із застосуванням ГІС-технологій. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (62), 337-346. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-25>

In cites: Serzhantova Yuliia, Brusentsova Nataliia, Zaliubovska Oksana (2025). Geoeological classification of lands by categories of value for the habitat of Artiodactyla: experience with the application of GIS technologies. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (62), 337-346. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-25> [in Ukrainian]

Загальна постановка проблеми. Питання оцінки цінності угідь для проживання різних видів тварин не нове. Інвентаризація та класифікація угідь за категоріями цінності проживання різних видів є важливим етапом впорядкування території та планування і проведення як подальших досліджень так і природоохоронних заходів. В той же час оцінка якості угідь відповідає 15-й Цілі сталого розвитку, що спрямована на збереження, відновлення та стале використання наземних екосистем, управління лісами та збереження біоріз-

номаніття [28].

Якість умов існування є основним чинником можливості проживання певної кількості тварин у природних комплексах [26]. Цей підхід покладено також в основу оцінки оптимальної чисельності мисливських видів тварин у лісомисливських господарствах [19]. Єдиної, затвердженої на державному рівні, методики оцінки придатності території для проживання видів з метою їх охорони не існує.

Бонітування мисливських угідь стосується

відомча розробка Державного комітету лісового господарства України, що затверджена Наказом про «Порядок проведення упорядкування мисливських угідь» [13]. Незважаючи на суперечливість завдань, якщо розібратись, то стає зрозумілим, що як природоохоронна, так і мисливсько-регулювальна діяльність мають на меті оптимізацію чисельності особин певних видів. Звісно, різною є кінцева мета діяльності, але завдання однакові: контроль та оптимізація чисельності через оцінку природних умов та ресурсів для проживання конкретних видів тварин для певної території. Саме ця підстава дає нам право скористатись методикою, що укладена для впорядкування мисливських угідь для потреб охорони природи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Класифікації та інвентаризації біотопів фауни приділяли увагу такі науковці: В.А. Токарський, В.Д. Бондаренко, Г.М. Муромський, І.В. Делеган, К.А. Татаринів, М.В. Чернявський, М.П. Рудиншин, О.Г. Часковський, Д.М. Данілов, І.М. Шейгас [5, 7, 10, 11, 17, 18, 21, 24, 25].

Проаналізувавши різні варіанти методики оцінки, напрацювання перерахованих вище авторів, можна зазначити, що всі методики базуються на оцінці умов проживання окремих мисливських видів. З метою спрощення процесу оцінювання, усю сукупність середовищних умов поділяють на окремі фактори, не застосовуючи загальної інтегральної оцінки. Як правило, такими факторами виступають умови середовища, які задовольняють або не задовольняють певні потреби конкретного виду [5]. Водночас вплив кожного з цих факторів на різні види тварин є неоднаковим і залежить від інтенсивності, регулярності прояву та їхньої біологічної значущості. У більшості випадків такий вплив складно виразити кількісно. Водночас Д.М. Данілов [3] в своїх роботах відзначає, що виділ, як найменша одиниця угіддя, що взятий окремо, не може бути самостійною ні екологічною, ні господарською одиницею, та говорить про необхідність визначати бонітет для більших територіальних одиниць, таких як урочище, промислова мисливська ділянка чи квартал за лісовпорядною системою.

Мартинів Є., Масайтис В. [6] пропонували використовувати бальну систему оцінювання позитивного й негативного впливу факторів на стан популяцій, доповнюючи її поправочними коефіцієнтами, що враховують значущість кожного фактору. Однак на сьогодні не існує універсальної таблиці або формули, яка б дозволяла точно врахувати всі умови середовища.

В Українській енциклопедії лісництва (друге видання) під науковим редагуванням Степана Генсірука зазначено, що для мисливських угідь комплексною та узагальненою оцінкою якості є боні-

тування, що визначається кормовими, захисними, гніздопридатними властивостями території [20].

Отже, під час бонітування мисливських угідь першочергово аналізуються природні умови території, зокрема фізіологічні характеристики лісових насаджень: тип лісу, видовий склад деревних і чагарникових порід, стан трав'яного та мохового покриву, вік окремих деревних порід, зімкнутість і ярусність деревостану. Також враховується запас деревних, гілкових і трав'янистих кормів, наявність кормів тваринного походження, періодичність урожайності основних кормових рослин, рівень захаращеності лісу, кількість дуплистих дерев, особливості рельєфу (експозиція та крутизна схилів), а також кліматичні та гідрологічні умови.

Таким чином, маємо, що для ефективного управління популяціями під час розробки природоохоронних заходів необхідно враховувати якість умов існування та просторовий розподіл ділянок з різною привабливістю [2].

Географічна інформаційна система (ГІС) як інструментальна система, яка призначена для збору, зберігання, обробки, доступу, візуалізації та розповсюдження просторово прив'язаних даних, є незамінним інструментом в інвентаризаційному плануванні, зокрема в сфері охорони довкілля [1, 4, 18]. Це обумовлено як зростанням обсягів інформації, необхідної для ефективного природоохоронного управління, так і підвищенням вимог до швидкості обробки даних при прийнятті управлінських рішень. Саме геоінформаційні системи здатні забезпечити зручні засоби для введення, збереження, пошуку, аналізу даних, а також для створення та друку текстово-графічних звітів.

Одним із прикладів комплексного застосування ГІС у поєднанні з аналітичними можливостями геопросторового аналізу є створення регіональної та місцевої екологічної мережі [23]. Тут важливим є всебічний аналіз інформації щодо землекористування, типів угідь, рельєфу, розташування природних і штучних екосистем, заповідних територій, населених пунктів тощо. ГІС дозволяє одночасно аналізувати багатовимірні просторові дані, використовувати цифрові карти для екологічного прогнозування, оцінки впливів на навколишнє середовище та своєчасного виявлення екологічних загроз із можливістю оперативного реагування [23].

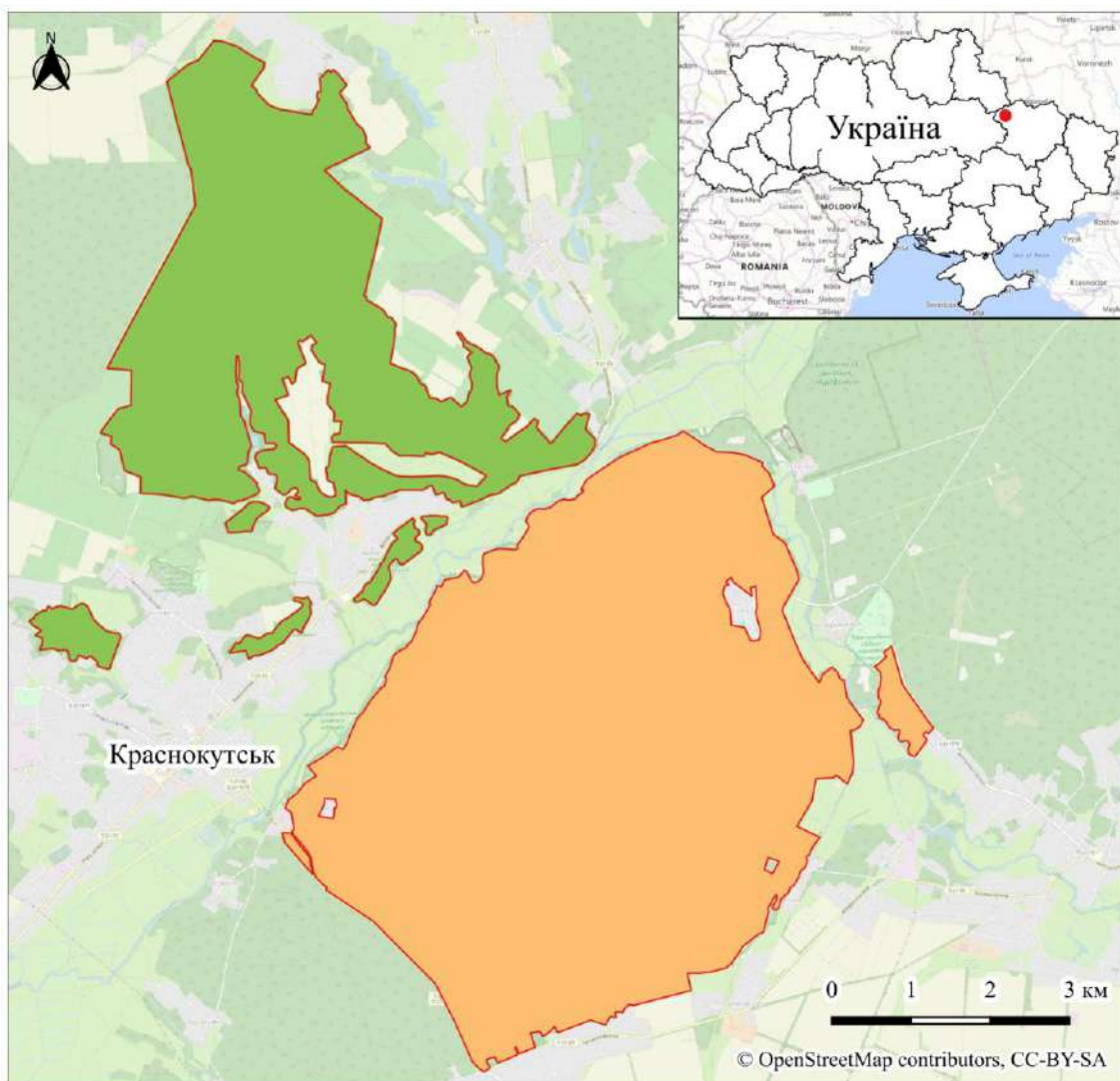
У нашому ж дослідженні ГІС виступає не лише засобом збереження інформації та її візуалізації, а й аналітичним інструментом для визначення градації кожного виділу досліджуваної території на предмет його цінності для проживання тварин.

Формулювання мети. Метою даної статті є висвітлення розробленого підходу до класифіка-

ції угідь за категоріями цінності для проживання ратичних тварин засобами ГІС.

Матеріали та методи. Роботу проводили у 2020 та 2023 роках для території національного природного парку (НПП) «Слобожанський». Парк розташований на північному заході Харківської області у Краснокутській селищній територіальній громаді Богодухівського району [16, 17]. Заповідна територія має площу 5244 га та представ-

лена переважно лісовими природними комплексами. Класифікацію угідь за категоріями цінності проводили для одного з двох природоохоронних науково-дослідних відділень (ПНДВ) парку – Пархомівського (рис. 1). Це відділення розташоване на правому березі річки Мерла і має площу 1741 га. Природні комплекси тут складають переважно дубові ліси, також присутні невеликі ділянки вільшняків та відкритих остепнених лук.



Умовні позначення:

— межа НПП "Слобожанський" Пархомівське ПНДВ Володимирівське ПНДВ

Рис. 1. Природоохоронні науково-дослідні відділення НПП «Слобожанський» /
Fig. 1. Environmental research departments of the Slobozhanskyi National Nature Park

У НПП «Слобожанський» мешкають чотири види ссавців ряду Ратичні (Artiodactyla): свиня дика (*Sus scrofa* Linnaeus, 1758), лось європейський (*Alces alces* Linnaeus, 1758), олень благородний (*Cervus elaphus* Linnaeus, 1758), сарна європейська (козуля) (*Capreolus capreolus* Linnaeus, 1758). Модельним об'єктом ми обрали сарну європейську.

Для проведення класифікації угідь НПП «Слобожанський» в якості основного джерела даних використані таксаційні описи земельних ділянок лісового фонду Парку станом на 01.01.2016 [15]. Ці матеріали містять інформацію про виділи кожного кварталу, їхню площу, характеристику деревостанів, підросту, підліску, додаткові відомості, яруси, основні показники елементів лісу та

господарське призначення.

Цінність кожного виділу лісових кварталів визначали відповідно до «Порядку проведення упорядкування мисливських угідь» затвердженого наказом Державного комітету лісового господарства України № 56 від 21.06.2001 зі змінами від 26.06.2006 [13, 8]. В залежності від захисних та кормових властивостей типи природних комплексів мають для різних тварин різне значення – тобто свій власний клас бонітету. Відповідно до Порядку проведення упорядкування мисливських угідь виділяють п'ять бонітетів:

- перший (1) – з дуже добрими кормовими та захисними властивостями;
- другий (2) – з добрими;
- третій (3) – із середніми;
- четвертий (4) – з поганими;
- п'ятий (5) – з непридатними для проживання умовами.

Обробку та візуалізацію даних проводили у програмному пакеті QGIS (QGIS.org, 2023). За основу брали векторні шари виділів та кварталів з базового набору шарів НПП «Слобожанський».

Виклад основного матеріалу дослідження.

У сучасних умовах система безперервного лісовпорядкування ґрунтується на повидільному банку даних «Лісовий фонд України» [12], формування якого розпочалося ще у 1990 році. Важливою складовою цієї системи є інформаційна база, що містить таксаційні характеристики кожної земельної ділянки (виділу) лісового фонду.

Для того щоб отримати дані щодо цінності угідь об'єктів природно-заповідного фонду як середовища існування окремих видів тварин, необхідно створити відповідний алгоритм їх аналізу. Як вже було зазначено, аналіз попередніх наробок показав, що розробленої методики для природоохоронних територій не існує. Тому за основу було взято методику впорядкування мисливських угідь та доопрацьовано в розрізі використання ГІС. Результати запропоновано представити у вигляді розроблених баз даних для подальших досліджень та картографічно-аналітичних матеріалів для наочної візуалізації, зокрема шляхом створення тематичних карт та детального описового аналізу.

На першому етапі був створений тематичний проект у геоінформаційній системі QGIS. До проекту додали шар виділів НПП «Слобожанський», який входить до набору базових шарів Парку. В атрибутивній таблиці створили окрему колонку для запису інформації про якість угідь для кожного виділу.

Національний природний парк «Слобожанський» розташований у межах Лісостепової зони (Лівобережноріпчівський край, Східнополтавська височинна область, Краснокутсько-Карлівський район) [15, 22, 9], що за лісомисливським

районуванням, яке представлено в Порядку проведення упорядкування мисливських угідь, відповідає Лісостеповій (Лівобережній) природній зоні [13]. З таблиці, «Класифікація мисливських угідь згідно з класом бонітету в межах природних зон» (фрагмент таблиці подано на рис. 2) даного Порядку отримано відповідні значення для занесення в атрибутивну таблицю тематичного векторного шару.

Наступним кроком є опрацювання даних лісотаксаційного впорядкування, зокрема встановлення таких характеристик для кожного виділу, як склад деревостану та вікова група насаджень, особливості відкритих ділянок та водойм. На основі цих показників можна перейти до етапу визначення типу мисливських угідь згідно з таблицею «Класифікація мисливських угідь за класом бонітету в межах певної зони». Отримані значення дозволяють присвоїти конкретній ділянці клас бонітету. Підсумком цього етапу є сформована атрибутивна таблиця, що містить відповідні класи бонітету.

Наприклад, для першого виділу першого кварталу Пархомівського ПНДВ з таблиці таксаційного опису земельних ділянок ми отримуємо інформацію про елементи лісу (змішаний ліс з підліском) та вікову групу (4 – пристиглі, стиглі та перестиглі насадження). За таблицею «Класифікація мисливських угідь згідно з класом бонітету в межах природних зон» Порядку знаходимо тип мисливських угідь, що відповідає нашій лісотаксаційній інформації. В нашому випадку для першого виділу першого кварталу це буде пункт 3.3.1 (рис. 2). І бонітет для сарни європейської даний виділ отримує 2 – з добрими властивостями. Те саме робимо з іншими виділами кожного кварталу. Дані заносимо у відповідний стовпчик атрибутивної таблиці.

Наступним кроком є візуалізація отриманих даних методом картограми (рис. 3). Дана візуалізація дозволяє наочно відобразити інформацію про придатність виділів для проживання сарни європейської у межах Пархомівського ПНДВ.

Для розуміння цінності угідь на більш високому рівні організації та управління лісовими територіями, на наступному етапі було проведено аналіз придатності кварталів для проживання сарни європейської. За своєю сутністю придатність кварталу є середнім арифметичним придатності виділів даного кварталу. Тим не менш, таку досить просту математичну операцію потрібно провести просторово. Для цього нами було розроблено алгоритм операцій в ГІС середовищі. У програмному пакеті QGIS векторний шар бонітетів виділів було переведено в растр за допомогою інструменту «Растрезиція» [27] (рис. 4). Для перетворення обрали роздільну здатність 10000×10000 пікселів.

Лісостепова (лівобережна) зона

№ п/п	Тип мисливських угідь	Підтип, вид мисливських угідь	Лось	Олень	Лань	Козал	Кабан	Заяць	Куріпка
		2.4. Рідколісся	4	4	4	4	4	3	4
		3.1. Молодняки 1-ї групи віку	1	1	2	1	2	1	3
		3.2. Молодняки 2-ї групи віку та середньовікові насадження							
		3.2.1. За наявності підросту, підліску та чагарничка	1	2	1	2	2	2	5
		3.2.2. Без - "-	2	3	3	3	3	3	5
		3.3. Пристиглі, стиглі та перестиглі насадження							
		3.3.1. За наявності підросту, підліску та чагарничка	2	2	2	2	4	4	5
		3.3.2. Без - "-	4	4	4	4	4	4	5
		3.4. Рідколісся	5	4	4	4	4	3	4
		2.2. Молодняки 2-ї групи віку та							

Рис. 2. Фрагмент таблиці Класифікація мисливських угідь згідно з класом бонітету в межах Лісостепової (Лівобережної) зони та визначення бонітету ратичних для підтипу мисливських угідь за пунктом 3.3.1 [13] /

Fig. 2. Fragment of the table Classification of hunting lands according to the quality class within the Forest-Steppe (Left-Bank) zone and determination of the quality of the hunting lands for the subtype of hunting lands according to paragraph 3.3.1

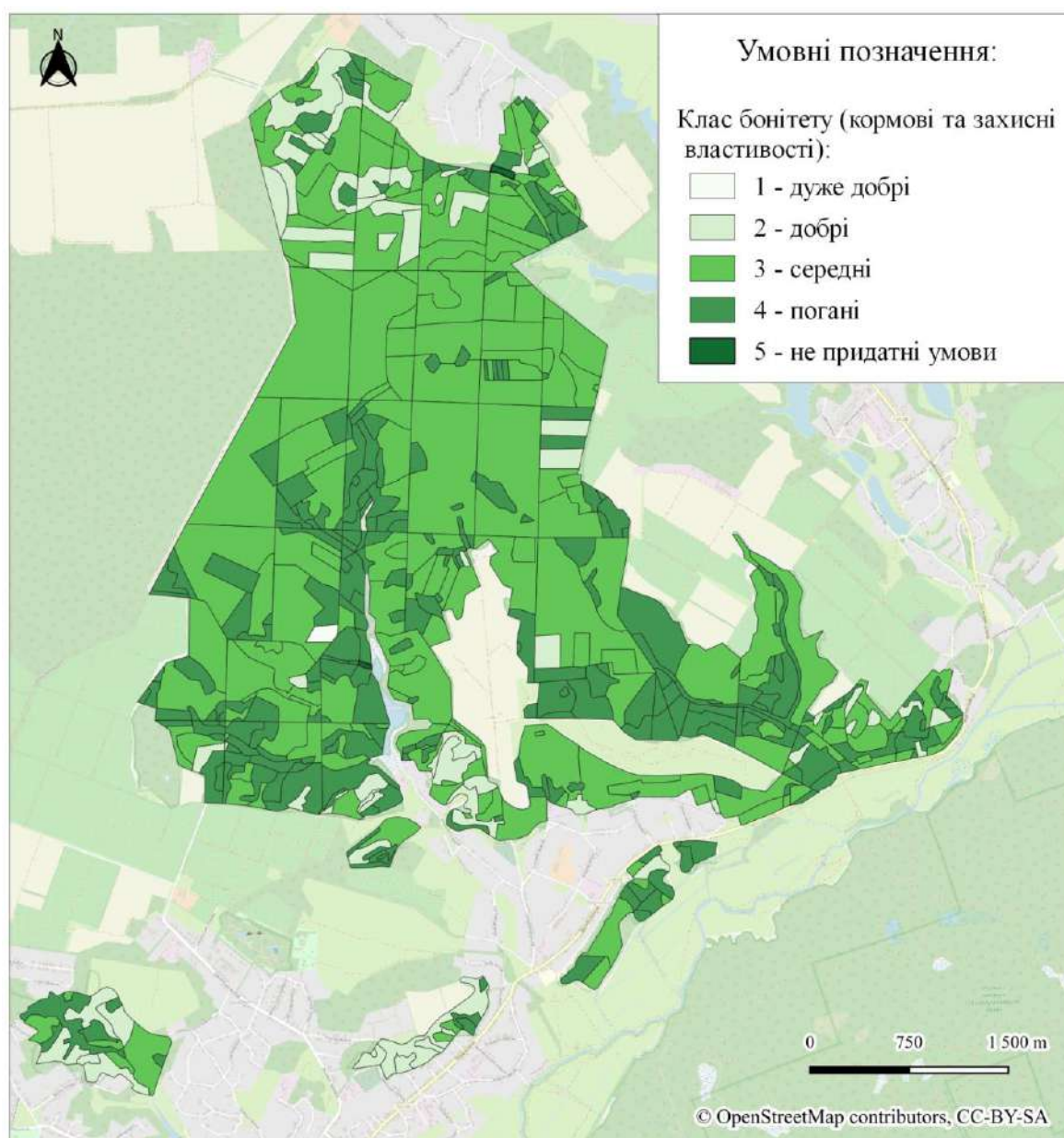


Рис. 3. Придатність виділів Пархомівського ПНДВ для проживання сарни європейської /
Fig. 3 Suitability of the Parkhomivka environmental research department forest subcompartment for the habitat of European roe deer

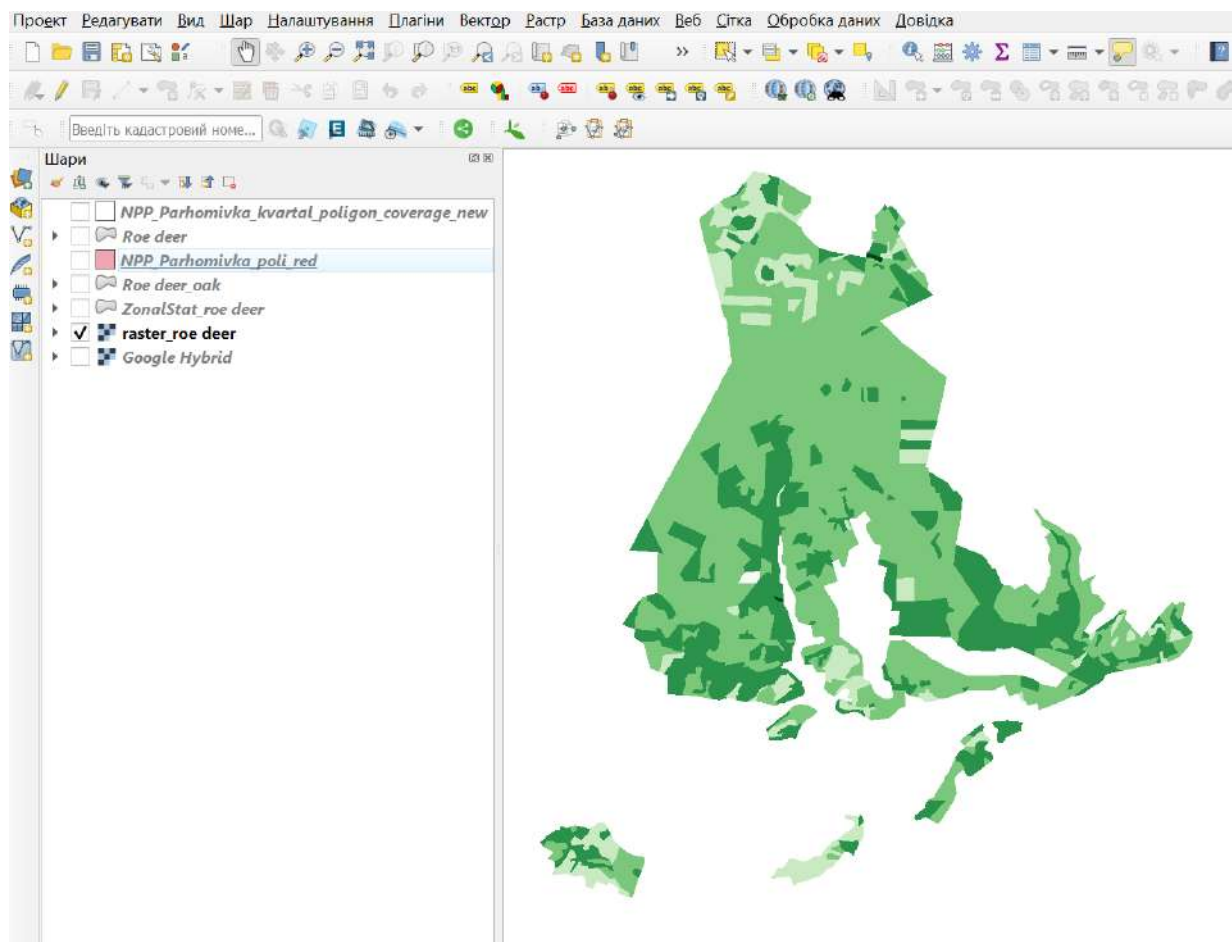


Рис. 4. Растр бонітетів виділів для сарни європейської Пархомівського ПНДВ /
 Fig. 4. The Raster of quality forest subcompartment for the habitat of European roe deer
 of the Parkhomivka environmental research department

Інструмент «Зональна статистика» використали для розрахунку класу бонітету для кожного кварталу за бонітетами виділів. Цей інструмент розрахував середнє арифметичне для значень пікселів, які потрапляли у межі полігонів векторного шару кварталів Пархомівського ПНДВ НПП «Слобожанський». Такий підхід дозволив урахувати вагу кожного виділу в кварталі, адже виділи мають різну форму та розмір.

Отримана картосхема показує, що більшість кварталів Пархомівського ПНДВ є середніми за якістю для проживання сарн (рис. 5). Ця територія містить переважно лісові насадження на основі стиглих дібров з домішками інших деревних порід, з багатим підліском, що забезпечує для сарни європейської достатні кормові ресурси та місця для схованок і розмноження.

Окрім того на основі бонітетів виділів може бути розрахований середній клас бонітету усього Пархомівського ПНДВ. Для цього під час використання інструменту «Зональна статистика» необхідно обрати у якості вхідних даних векторний шар полігону природоохоронного науково-дослідного відділення. Значення середнього класу бонітету надає змогу оцінити оптимальну чисель-

ність тварин, яка може проживати на певній території [2, 13, 11]. У літературних джерелах з мисливствознавства також наводяться формули, які дозволяють обчислювати цей показник [11]. Порядком проведення упорядкування мисливських угідь додатково передбачається можливість внесення поправок, які збільшують, або зменшують значення середнього класу бонітету [13]. Ці поправки пов'язані із врахуванням сили дії абіотичних, біотичних та антропогенних чинників.

Наведений нами алгоритм класифікації угідь за категоріями цінності для сарни європейської на основі даних лісовпорядкування може бути здійснений не тільки у QGIS, але й у інших геоінформаційних системах із урахуванням наявних в них інструментів. Також таку класифікацію та укладання тематичних картосхем можна здійснювати і для інших видів мисливських тварин, наведених у «Порядку проведення упорядкування мисливських угідь». Види тварин, які не належать до категорії «мисливських» потребують окремої розробки системи класифікації угідь за категоріями цінності.

Використання у класифікації угідь за категоріями цінності застарілих матеріалів лісовпоряд-

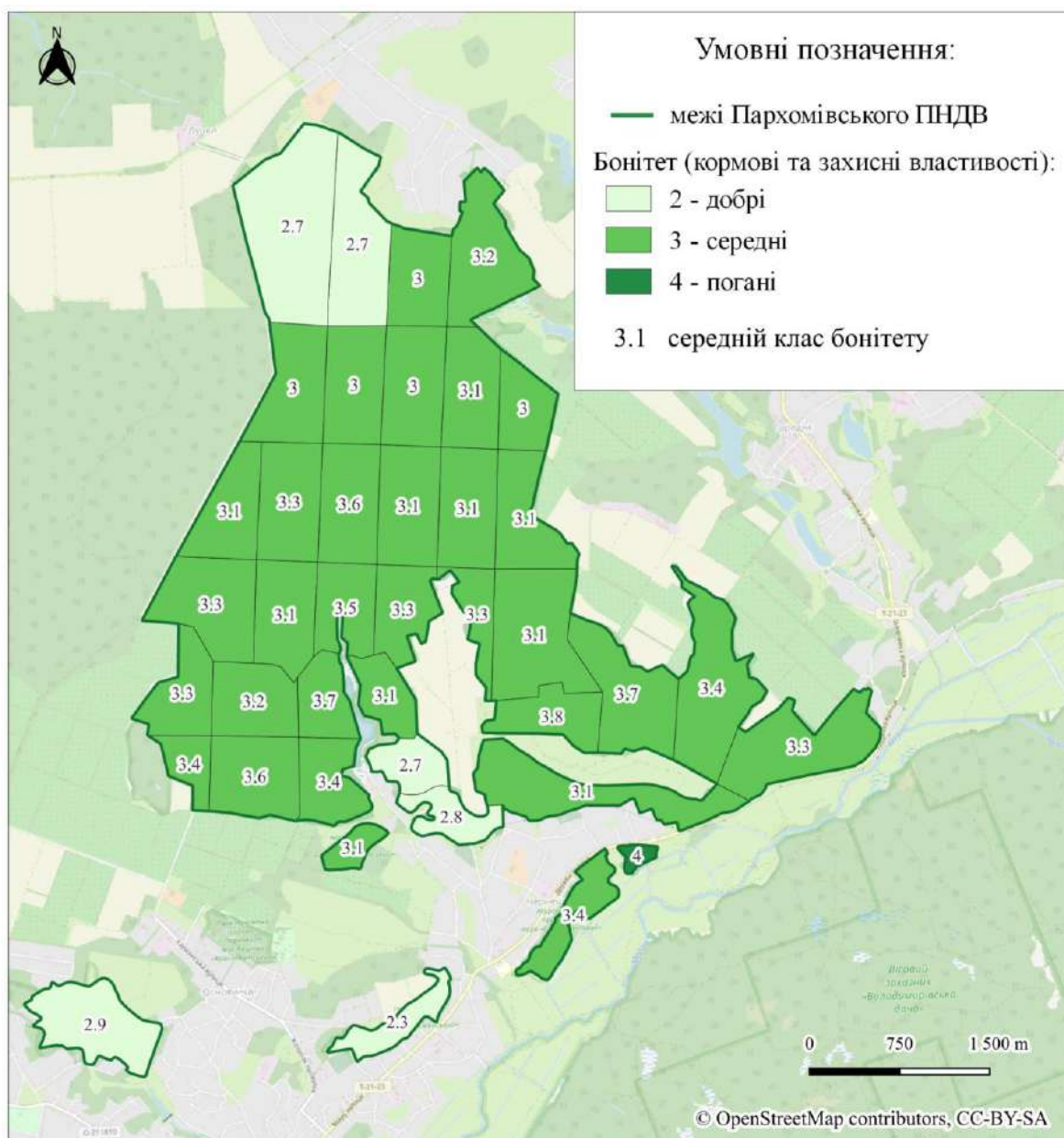


Рис. 5. Придатність кварталів Пархомівського ПНДВ для проживання сарни європейської /
Fig. 5. Suitability of the Parkhomivka environmental research department forest compartment
for the habitat of European roe deer

кування може бути причиною відображення неактуальних даних у розроблених картографічних матеріалах придатності території для проживання видів. Для підвищення якості даних у роботу бажано включати результати нещодавніх польових обстежень. Також складнощі можуть виникати під час визначення групи віку деревостанів, де необхідно звертати увагу на породний склад та вік дерев.

У цілому, отримані результати, зокрема алгоритм оцінки придатності територій для проживання Ратичних, мають вагоме значення для національного природного парку «Слобожанський» та можуть бути використані для будь-яких інших територій природно-заповідного фонду. Це обумовлено насамперед тим, що методика дозволяє виявляти перспективні ділянки для перебування

тварин і, відповідно, планувати природоохоронні заходи [14].

Висновки. Проведене дослідження ілюструє можливості застосування ландшафтно-географічних методів та відповідних критеріїв оцінки потенціалу природних комплексів національного природного парку «Слобожанський» у відповідності до геоекологічних потреб певних видів тваринного світу, в нашому дослідженні сарни європейської. Наведена методика дозволяє врахувати критерії, які не були враховані при проектуванні національного природного парку, але повинні бути використані під час його функціонування. Отримані картографічні матеріали можуть бути в подальшому використані для роботи наукового-дослідного відділу НПП «Слобожанський» для прове-

дення робіт із збереження та відтворення певних видів і, за необхідності, врегулювання їхньої чисельності.

Висвітлена методика базується на основних положеннях методики бонітування мисливських угідь та адаптована під можливості сучасних ГІС-технологій, що дозволяє ефективно працювати з великими масивами даних, в тому числі матеріалами лісотаксації та лісовпорядкування, зберігати, структурувати дані та забезпечувати достатньо високий рівень автоматизації для здійснення

подальшої оцінки (бонітування) та візуалізації умов проживання різних видів тварин.

Представлений у статті алгоритм оцінки цінності угідь для проживання окремих видів тварин на основі матеріалів лісовпорядкування можна застосовувати до різних територій у тому числі тих, що входять до природно-заповідного фонду України. Укладений алгоритм за своєю суттю є геоecологічним оцінюванням угідь, які заселені чи потенційно можуть бути заселені певним видом через оцінку придатності умов.

Список використаних джерел

1. Бодня, О., Сінна, О., Олійников, І., & Овчаренко, А. (2016). Ландшафтне картографування НПП «Слобожанський» засобами мобільних, настільних та веб-додатків ArcGIS. Проблеми безперервної географічної освіти та картографії: Збірник наукових праць (23, с. 15–21). ХНУ ім. В.Н. Каразіна.
2. Брусенцова, Н., & Сержантова, Ю. (2024). Придатність листяного лісу НПП «Слобожанський» (Харківська обл., Україна) для проживання лося (*alces alces*). У "Природоохоронні території України: Сучасні виклики та перспективи розвитку" (с. 40–43). СПОЛОМ.
3. Данілов, Д. (1960). Мисливські угіддя: Навчальний посібник. Лісова промисловість.
4. Залюбовська, О., Овчаренко, А., & Черваньов, І. (2023). Ландшафтні дослідження: Від парадигми через ГІС-технологію до моніторингу (на прикладі території НПП «Слобожанський»). Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», (59), 110–124. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-09>
5. Кузякін, В. (1979). Мисливська таксація: Навчальний посібник. Лісова промисловість.
6. Мартинов, Є., Масайтис, В., & Гороховніков, А. (2014). Мисливська справа. Мисливствознавство, мисливське господарство: Навчальний посібник. Лань.
7. Бондаренко, В., Делеган, І., & Татарінов, К. (1993). Мисливствознавство: Навчальний посібник (В. Бондаренко, Ред.). НМК ВО.
8. Настанова з упорядкування мисливських угідь: Держкомлісгосп України (2013) (Україна).
9. Наумов, А. (1902 (1903)). Флора околиць села Рублівки Богодухівського повіту. Праці Харківського товариства дослідників природи при Харківському університеті, 37, 51–150.
10. Нагребський, Л. (1977). Організація і техніка полювання. Лісова промисловість.
11. Петриченко, В., Лебедєва, Н., & Карташова, Я. (2009). Типологія мисливських угідь: Навчальний посібник. ЗНУ.
12. Про затвердження Порядку ведення лісовпорядкування, Постанова Кабінету Міністрів України від 7.02.2023 №112 № 112 (2003). Офіційний вісник України, (20), 14.
13. Про затвердження Порядку проведення упорядкування мисливських угідь, Наказ Державного комітету лісового господарства України № 56 (2001). Офіційний вісник України, (36), 311.
14. Про природно-заповідний фонд України, Закон України № 2456-ХІІ (1992). Відомості Верховної Ради України, (34 стаття 502).
15. Васенко, О. та ін. (2015). Проект організації території національного природного парку «Слобожанський», охорони, відтворення та рекреаційного використання його природних комплексів і об'єктів.
16. Клімов, О. (2009). Проект створення національного природного парку «Слобожанський» (Рукопис).
17. Рудийшин, М. (1987). Раціональне ведення мисливського господарства (К. Малиновський, Ред.). Каменяр.
18. Рижак, І., & Часковський, О. (2003). Дистанційні методи інвентаризації біотопів фауни (на прикладі природного заповідника «Розточчя»). Науковий вісник, (13), 47–51.
19. Різун Е. (2019). Якісна оцінка умов існування для сарни європейської (*Capreolus capreolus* L.) у лісостеповій (правобережній) лісомисливській зоні України. *Theriologia Ucrainica*. 2019, 74–79. <https://doi.org/10.15407/pts2019.18.074>
20. Стойко, С., Ковальчук, І., & Коній, Л. (2007). Скарбниця знань про український ліс : Українська енциклопедія лісівництва (С. Генсірука, Ред.).
21. Токарський, В. (2003). Рідкісні та зникаючі ссавці заповідних територій Харківської області. Наукові дослідження на територіях природно-заповідного фонду Харківської області, 75–81.
22. Маринич, О. та ін. (2007). Фізико-географічне районування - 1:2500 000. У Національний Атлас України (с. 222–224). ДНВП «Картографія».
23. Часковський, О., Андрейчук, Ю., & Ямелинець, Т. (2021). Застосування ГІС у природоохоронній справі на прикладі відкритої програми QGIS: Навчальний посібник. ЛНУ ім. Івана Франка, Простір-М.
24. Шейгас, І. (2021). Характеристика дії лімітуючих факторів на стан мисливського ресурсу України. *Theriology Ucrainica*, (21), 141–151. <https://doi.org/10.15407/TU2113>
25. Шейгас. (2005). Типи мисливських угідь, що максимально забезпечують кормові та захисні умови проживання диких тварин-фітофагів в умовах Південного степу України. Науковий вісник УкрДЛТУ, (15 (1)), 102–107.

26. Brazaitis, G. and others (2014). Landscape effect for the Cervidae Cervidae in human-dominated fragmented forests. *European Journal of Forest Research*, (133), 857–869. <https://doi.org/10.1007/s10342-014-0802-x>
27. QGIS Geographic Information System. QGIS Association. URL: <http://www.qgis.org> (дата звернення: 01.03.2025)
28. What are the Sustainable Development Goals? URL: <https://www.undp.org/ukraine/sustainable-development-goals> (дата звернення: 01.03.2025)

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Geocological classification of lands by categories of value for the habitat of Artiodactyla: experience with the application of GIS technologies

Yuliia Serzhantova¹

Senior Lecturer, Department of Physical Geography and Cartography,

¹ V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine;

Nataliia Brusentsova^{2,3}

PhD (Biology), Senior Researcher,

² Kuialnytskyi National Nature Park, Odesa, Ukraine;

³ Slobozhanskyi National Nature Park, Krasnokutsk, Ukraine;

Oksana Zaliubovska¹

PhD (Geography), Associate Professor,

Department of Physical Geography and Cartography

ABSTRACT

Introduction. The inventory and classification of lands according to the categories of habitat value of various species is an important stage in the arrangement of the territory and the planning and carrying out of further research and environmental protection measures. The land quality assessment is in line with the 15th Sustainable Development Goal, which aims to conserve, restore and sustainably use terrestrial ecosystems, manage forests and conserve biodiversity. There is currently no approved methodology for assessing the suitability of protected areas for habitation of species. Quality of living conditions is the basis for assessing the optimal number of hunting species in forestry and hunting enterprises. This methodology was adapted for the use of GIS (QGIS) as the main tool that provides processing of significant data sets, simplifies and speeds up the routine part of the study and allows you to visualize the results for further analysis. The aim of this article is to develop an approach to classifying lands by categories of value for habitation of Artiodactyla using GIS.

Materials and methods. The approbation and step-by-step description of the developed approach is presented in the article on the example of assessing the territory of the Slobozhanskyi National Nature Park (Parkhomivka Environmental research department) for the habitat of the European roe deer (*Capreolus capreolus* Linnaeus, 1758) as a model species of Artiodactyla. To classify the lands of the Slobozhanskyi National Nature Park (SNNP), the descriptions of the Park forestry subcompartments and compartments were used as the main source of data. These materials contain information about all forestry subcompartments: their areas, characteristics of forest stands, undergrowth, and additional information. The value of each forest subcompartments was determined in accordance with the “Procedure for the Arrangement of Hunting Lands” depending on protective and forage properties. Types of natural complexes have different values for different animals – their own quality class (bonitet).

Presentation of the main material. The basis was the vector layer of forestry subcompartments of the SNNP. For each subcompartment of the Parkhomivka Environmental research department the class of bonitet was determined based on the characteristics of the forest stands. All data was entered into the corresponding column of the attribute table. In the QGIS software package, the vector layer of subcompartments bonitet was converted into a raster using the “Rasterization” tool. To calculate the average quality class for compartments based on smallest units (subcompartments), the “Zonal Statistics” tool was used. This made it possible to take into consideration the different shapes and sizes of forest plots.

Conclusion. The conducted study illustrates the possibilities of applying landscape-geographic methods and relevant criteria for assessing the potential of landscapes of the SNNP in accordance with the geocological needs for game species of mammals, in our case for European roe deer. The algorithm presented in the article for assessing the value of lands for the habitat of Artiodactyla based on forest management materials can be applied to various territories, including protected areas of Ukraine. It is essentially a geocological assessment of lands that are inhabited or potentially inhabited by a certain species through an assessment of the suitability of conditions.

Keywords: the habitats of Artiodactyla, geocological assessment, geographic information systems (GIS), Artiodactyla, habitat assessment, forest management plans, forest taxonomy, geocological assessment, life on land, national nature park, Ukraine.

References

1. Bodnia O., Sinna O., Oliynikov I., & Ovcharenko A. (2016). Landscape mapping of the Slobozhanskyi National Park using mobile, desktop and web applications ArcGIS. Problems of continuous geographic education and cartography: Collection of scientific papers. Kharkiv: V.N. Karazin KhNU, 23, 15-21 [in Ukrainian].
2. Brusentsova N. O., Serzhantova Y. Yu. (2024). Suitability of the deciduous forest of the Slobozhanskyi National Park (Kharkiv region, Ukraine) for the habitat of moose (*Alces alces*). International scientific and practical conference dedicated to the 40th anniversary of the Roztochchya Nature Reserve. "Protected territories of Ukraine: modern challenges and development prospects" (40-43). Lviv: SPOLOM [in Ukrainian].
3. Danilov D. M. (1960). Hunting grounds. Kyiv: "Forest industry" [in Ukrainian].
4. Zaliubovskaya Oksana, Ovcharenko Alina, & Chervanyov Ihor (2023). Landscape studies: from paradigm through GIS technology to monitoring (on the example of the territory of the Slobozhanskyi National Nature Reserve). Bulletin of the V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (59), 110-124. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-09>
5. Kuzyakin V. A. (1979). Hunting taxation. Kyiv: "Forest industry" [in Ukrainian].
6. Martynov E., Masaitys V., & Gorokhovnikov A. (2014). Hunting. Hunting science, hunting economy. Textbook. Kyiv: Lan [in Ukrainian].
7. Bondarenko V.D., Delegan I.V., & Tatarinov K.A. (1993). Hunting science. Kyiv: NMK VO [in Ukrainian].
8. Guidelines for the arrangement of hunting grounds (2002). Kyiv: State Committee for Forestry and Fisheries of Ukraine [in Ukrainian].
9. Naumov A. I. (1902 (1903)). Flora of the vicinity of the village of Rublivka, Bogodukhiv district. Proceedings of the Kharkiv Society of Nature Researchers at Kharkiv University, 37, 51-150 [in Ukrainian].
10. Nagretsky L. N. et al. (1977). Organization and technique of hunting. Kyiv: "Forest Industry" [in Ukrainian].
11. Petrichenko V. V., Lebedeva N. I., & Kartashova Ya. M. (2009). Typology of hunting grounds: Textbook. Zaporizhzhia: ZNU [in Ukrainian].
12. On approval of the Procedure for conducting forest management. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 02/07/2023 No. 112 (2003) (Ukraine). Official Gazette of Ukraine, 20, 14 [in Ukrainian].
13. On approval of the Procedure for conducting forest management. Order of the State Forestry Committee of Ukraine dated 06/21/2001 No. 56 (2001). Official Gazette of Ukraine, 36, 311 [in Ukrainian].
14. Law On the Nature Reserve Fund of Ukraine. Law of Ukraine dated 16/06/1992 No. 2456-XII (1992). Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine, 34, Article 502. [in Ukrainian].
15. Vasenko O. G. & others. (2015). The Project for the organization of the territory of the national natural park "Slobozhansky", protection, restoration and recreational use of its natural complexes and objects. Kharkiv [in Ukrainian].
16. Klimov O. V., Filatova O. V., Nadtochii H. S. & others. (2009). The project of creation of the national park "Slobozhanskyi". Kharkiv: UkrNDI of Environmental Problems [in Ukrainian].
17. M.P. Rudyshyn & others (1987). Rational management of hunting (K.A. Malinovsky, Red). Lviv: Kamenyar [in Ukrainian].
18. Ryzhak I. V., Chaskovsky O. G. (2003). Remote methods for inventorying fauna biotopes (on the example of the Roztochchya nature reserve). Scientific Bulletin, 13, 47-51 [in Ukrainian].
19. Rizun E. M. (2019). Qualitative assessment of living conditions for the European roe deer (*Capreolus capreolus* L.) in the forest-steppe (right-bank) forestry zone of Ukraine. Theriologia Ucrainica, 18, 74-79 [in Ukrainian]. DOI: <https://10.15407/pts2019.18.074>
20. Stoyko S., Kovalchuk I., & Kopyi L. (2007). Treasury of knowledge about the Ukrainian forest: Ukrainian encyclopedia of forestry. (S. A. Gensiruk, Red). Lviv [in Ukrainian].
21. Tokarskyi V.A. (2003). Rare and endangered mammals of protected areas of the Kharkiv region. Scientific research on the territories of the nature reserve fund of the Kharkiv region (75-81). Kharkiv: Collection of scientific articles [in Ukrainian].
22. O.M. Marynich and others (2007). Physical and geographical zoning - 1:2500,000/ National Atlas of Ukraine. Kyiv: DNVP "Cartography" [in Ukrainian].
23. Chaskovskyi O., Andreychuk Yu., & Yamelinets T. (2021). Application of GIS in environmental protection on the example of the open program QGIS: teaching aids. Lviv: LNU named after Ivan Franko, Publishing House Prostir-M [in Ukrainian].
24. Sheygas I. M. (2021). Characteristics of the action of limiting factors on the state of the hunting resource of Ukraine. Theriologia Ucrainica, 21, 141-151 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/TU2113>
25. Sheygas, I. M. (2005). Types of hunting grounds that provide maximum fodder and protective conditions for the habitat of wild phytophagous animals in the conditions of the Southern Steppe of Ukraine. Scientific Bulletin of UkrDLTU, 15, 102-107 [in Ukrainian].
26. Brazaitis G. and others (2014). Landscape effect for the Cervidae Cervidae in human-dominated fragmented forests. European Journal of Forest Research, 133, 857-869. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-014-0802-x>
27. QGIS Geographic Information System. QGIS Association. URL: <http://www.qgis.org> (accessed 01.03.2025)

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 20 January 2025

Accepted 9 May 2025

Morphodynamic processes in the coastal zone of the Caspian Sea (Gobustan, Azerbaijan): distribution and risks of manifestation

Stara Tarikhazer

DSc (Geography), Associate Professor,
Institute of Geography named after Academician Hasan Aliyev, Ministry of Science and Education
of the Republic of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan,
e-mail: kerimov17@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0001-5870-1721>

ABSTRACT

Problem statement. This study aims to analyze hazardous morphogenetic processes associated with the active development of tourism and recreational activities in the southeastern part of the Greater Caucasus. The importance of this problem lies in the fact that the creation of a National Geopark with internationally significant is planned in the territory of Gobustan.

Purpose - The study area – Gobustan, as an integral part of the mobile epigeosynclinal orogenetic zone, is characterised by a rather complex geological and geomorphological structure. Located in the southeastern subsidence of the Greater Caucasus, near the Caspian Sea and representing part of the geosynclinal folded area of the same name, it is very promising in terms of tourism and recreation. Due to the significant diversity of the geological formations widespread, the tectonic structure, and the differentiated nature of intense neotectonic movements, the landforms of the territory are characterised by dangerous morphodynamic processes (earthquakes of magnitude 7-8, mud volcano eruptions, landslides, mudflows, ravines, etc.).

Research method. Based on our field geological and geomorphological studies, cartographic material, and the use of aerial photographs (ACS) from 1996, 2000-2020 at a scale of 1:60,000, the morphogenetic tension areas of Gobustan have been revealed for the first time. At the same time, the most dangerous processes (landslides, mudflows), as well as the morphometry of the landform (vertical and horizontal dismemberment, steepness and exposure of slopes) were highlighted.

Research results. Territories with characteristic geological and geomorphological conditions, where morphogenetic processes differ in the nature of manifestation and degree of tension (weakly, moderately and tense): the area of a slightly tense territory (I b.) is 298.81 hectares (53.4%), the area of medium-stressed territory (II b.) - 217.67 hectares (38.9%), the area of the tense territory (III b.) - 43 hectares (7.7%). As a result of a detailed study of the collected information and data, the study area according to the nature of the surface and elevations, as well as under the condition of morphometric tension and taking into account varying degrees of morphogenetic danger, the territory of Gobustan was zoned according to the distribution of morphogenetic processes and landforms: the middle mountains (with absolute heights up to 1300-1700 m), the lowlands (with absolute heights up to 800-1000 m) and the lowland zone (with absolute heights up to 50-100 m). In these zones, some morphogenetic processes pose a real threat to the development of recreational and tourism activities that are exclusively dependent on the landforms, and the construction of the corresponding infrastructure.

Conclusion. The research results will make it possible to use the data obtained to develop a Program for the safe and sustainable functioning and development of the geosystems of Azerbaijan for recreational and tourism development. The relevance of this work also lies in the fact that it is planned to create a National Geopark with internationally significant in the territory of Gobustan.

Keywords: *morphometric indicators; morphogenetic processes; morphodynamic tension; danger; natural risk; anthropogenic impact.*

In cites: Tarikhazer Stara (2025). Morphodynamic processes in the coastal zone of the Caspian Sea (Gobustan, Azerbaijan): distribution and risks of manifestation. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (62), 347-359. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-26>

Introduction. Today, the rapidly developing recreation (leisure industry) has become one of the important sectors of the Azerbaijani economy. The main problem of recreational development of the territory of the republic is nature protection, various aspects of which should be taken into account when creating territorial recreational systems. The implementation of recreational activities, especially within specially protected natural areas (national reserves, national protected areas, and national parks), requires scientific justification, taking into account the assessment of the study area for the suitability of various types of tourism and recreation (Zouros, 2008; Yaholnyk, Manyuk, 2017; Brilha, 2018; Shimshek, 2020; Niemets, Kandyba, Kobylin, Kostrikov, Dobrovolskaya, 2021; Briggs, Dowling, Newsome, 2021; Tovisetkul, Lengvtaya, Verathanatchakul, Benjaku,

2021; Lukáč, Štraba, Čerhega, Khouri, 2021; Kuhn, Santos, Jesus, Kolya, Reis, 2022). Such an assessment, in our opinion, includes recreational zoning of the territory, the development of systems of geomorphological, geological, and environmental criteria, the determination of the degree of natural risk, etc. Therefore, unstable and peculiar landforms can become the main threat to tourist and recreational development (Budagov, Alizade, Tarikhazer, 2005).

The study area - Gobustan, as an integral part of the mobile epigeosynclinal orogenetic zone, is characterised by a rather complex geological and geomorphological structure. Located in the southeastern subsidence of the Greater Caucasus, near the Caspian Sea and representing part of the geosynclinal folded area of the same name, it is very promising in terms of tourism and recreation. Due to the significant di-

versity of the geological formations widespread, the tectonic structure, and the differentiated nature of intense neotectonic movements, the landforms of the territory are characterised by dangerous morphodynamic processes (earthquakes of magnitude 7-8, mud volcano eruptions, landslides, mudflows, ravines, etc.). Therefore, in the process of developing the territory of Gobustan for the development of tourism, the problem of studying, evaluating, and predicting the formation of modern dangerous natural destructive processes is of no minor importance. Geodynamically active, differentiated development of a set of endogenously and exogenously determined processes of land formation invariably changes the morphological (morphometric) type of landform, which is very important to take into account when developing extremely unstable mountain geosystems for recreation. The relevance of this work also lies in the fact that it is planned to create a National Geopark with internationally significant in the territory of Gobustan.

The purpose of the research is to analyse dangerous morphogenetic processes in connection with the active development of tourist and recreational activities in Gobustan. Based on the field geological and geomorphological studies, literary and cartographic material, and interpretation of aerospace images (ASI), the study aims to identify areas of morphodynamic intensity of Gobustan, taking into account dangerous morphogenetic processes and landform morphometry. Ultimately, the research aims to carry out zoning of the territory of Gobustan according to the distribution of morphogenetic processes and landforms (low-lying, low-mountain, and mid-mountain zones). Independently, each zone is characterised by a different level of eco-geomorphological vulnerability, some of which pose a real threat to the development of recreational and tourist activities.

Materials and methods of research. The issues of eliminating or minimizing the dangerous consequences of nature management of mountain geosystems in recent decades have been the subject of attention of researchers, as a result of which certain experience has been gained in developing the problem of nature management (Baynes, Lee, Stewart, 2002; Brardinoni, Slaymaker, Hassan, 2003; Chacon, Iriagaray, Fernandez et al., 2006; Corominas, van Westen, Frattini et al., 2014; Schlögel, Doubre, Malet et al., 2015).

Gobustan is characterized by the manifestation of morphogenetic processes, among which the most threatening are seismicity and non-tectonic activity, landslides, and mudflows. Their activation can lead to high risks and dangerous environmental, as well as socio-economic consequences.

The danger posed by morphodynamic processes encourages researchers to look for the most advanced

approaches and tools for their prediction. In recent years, probabilistic-statistical methods have been increasingly used for forecasting purposes (Guzzetti, Reichenbach, Cardinali, Galli, Ardizzone, 2005; Lee, Pradhan, 2007; Castellanos Abella, Van Westen, 2008; Oh, Lee, 2011; Cantarino, Carrion, Goerlich, Martinez Ibañez, 2019; Roccati, Paliaga, Luino, Facchini F, Turconi L, 2021).

According to Imrani, Huseynzade, Bilalov (2024) *“Currently, there is no general methodology for recreational and touristic landform analysis. This is explained by the rules that impose numerous types of recreation on geomorphological conditions”*. Imrani, Huseynzade, Bilalov (2024) divides the existing methods of recreational and tourist analysis into the following groups: 1. The use of certain morphometric features using GIS, where *“analysis is carried out in advance according to specified standards”*; 2. Field studies, where the analysis of the landform is carried out by description and observation. To assess the structure of hazardous morphogenetic processes, a number of authors (Imrani, Veliyeva, 2021, 2023 and others) used the method of expert statistical estimation of the distribution area (intensity) of the process in the geo-ecological region. This method was used to assess these processes within the allocated zones of the territory of Gobustan for the purpose of tourist and recreational development.

The development of technical means for remote sensing of the Earth from space and obtaining high-resolution aerospace images (ASI) made it possible to improve the efficiency and increase the amount of information in the course of the study in order to study the dangerous morphogenetic processes of Gobustan. The data obtained from deciphering different-scale and different-time ASI data make it possible to quickly compile risk maps that objectively display the quantitative and qualitative characteristics of dangerous morphogenetic processes. The study was carried out in the ArcGIS software package, the use of which create a favourable condition for performing the necessary manipulations with cartographic materials and satellite images and obtain the necessary information about the estimated indicators.

Factors of development of morphogenetic processes and risks of their formation. In recent years, the number of morphodynamic processes in the territory of the Gobustan has increased dramatically. If earlier these processes were mainly developed in the upper parts of the middle and high mountains, at the present moment, these processes are actively developing in the low-mountain and foothill zones of the basin. Along with natural factors, technogenic activity has played a significant role in this area (earthworks on slopes in the process of road construction, construction of tourist facilities, etc.). Morphodynamic processes are long-term successive

events, starting from their formation and ending with the results. Sometimes there is a need only to prevent their devastating consequences. In many cases, it is impossible to eliminate the root cause of these processes, and then it becomes beneficial to reduce the consequences than to try to eliminate the cause. More often they are formed under the influence of geological-tectonic, topographic, hydrological-climatic and anthropogenic factors. Warnes notes (1981): *"In most cases, many factors operate simultaneously; therefore, trying to find out which of them caused the dangerous process is not only difficult, but also wrong. Often the latter factor acts as a trigger."*

Research results. The territory of Gobustan occupies a significant part of the region of the south-eastern periclinal subsidence of the Greater Caucasus. The northern border of the territory runs along the southern slope of the Greater Caucasian Range along the line connecting the villages of Astrakhanovka and Ambizlar, as well as the peaks of the Gady and Kurkachidag Mountains. In the east, Gobustan borders the Absheron Peninsula, and the valley of the Pirsatchay River serves as the western border of the region.

Gobustan is characterised mainly by direct tectonic landforms, where ridges with absolute heights up to 800-1100 m correspond to anticlinal folds, while basins and valleys correspond to synclinal folds. In places, elements of the inversion landforms are traced. Late Pliocene planation surfaces are widely developed in the extreme western part of the region. In the eastern direction, there is an increase in the differentiation of tectonic movements, which are reflected in folding and topography. In this direction, immersion of structures and a decrease in the heights of the landforms are observed. Mud volcanic activity is intensifying, which forms the main background of the landforms in some places. In the southeastern part of Gobustan, an inversion landforms are widely developed due to litho-structural features. Arid-denudation processes and the landforms created by them (badlands, clayey karst, suffosion basins) are widely developed.

In view of the above, the study area has been divided into the following zones according to the nature of the surface, the altitude and the degree of geomorphological vulnerability: highland (with absolute heights up to 1300-1700 m), low mountain range (with absolute heights up to 800-1000 m) and lowland zone (with absolute heights up to 50-100 m). The morphology of the listed landform steps is closely related to the features of the geological structure and lithology of rocks, the intensity, direction, and degree of differentiation of neotectonic movements. Neotectonic movements in Gobustan were accompanied by transgressions and regressions of the Caspian Sea, which left a series of seashore terraces. The rivers of the region gradually (discontinuously) engrafted and

formed terraced valleys, while arid climatic conditions led to the widespread development of a complex of arid-denudation landforms, due to which the study area has a variety of types and originality of landforms (Karimov, Tarikhazer, Karimova, 2023).

The **highlands** in the north of Gobustan are limited by a system of mountain ranges, ridges, and individual ridge-shaped uplands of east-west trending. The ridges gradually decrease, branching off and moving away to the southeast. The extreme in the northeast is the Gady-Kurkachidag Ridge, which lies through the peaks of the Gady and Kurkachidag Mountains, and gradually plunges into the upper reaches of the Vegver River valley. The Kemchi-Gabandag Ridge stretches to the south-west of the Gady-Kurkachidag Ridge, almost parallel to it, traced through the peaks of the Kemchi and Gabandagh Mountains. The Aladash-Shakhandagh Ridge stretches to the south-west of the Kemchi-Gabandagh Ridge, uniting the hills of the same name, which are flat, slightly concave oblong-narrow plateaus. Wide plateau-like watersheds, broken by soft ledges into separate isolated plateaus, forming large steps in the rocks of the Upper Cretaceous and Tertiary age, are characterised in the northern and northwestern parts of Gobustan, between the valleys of the Pirsatchay, Gozluchay, and Chikilchay Rivers. The zone under consideration differs from the previous one not only in the greater smoothness of the forms but also in the roundness of their outlines in the plan. The main orographic elements here are: Duzan, Gyumbidag, Yurtandag, Astrakhan, and other plateaus.

Low mountains. The Sundu and Maraza plateaus lie to the south-east of the mid-mountain ridges of Gobustan, and end in the south-east with the remnant massif beneath the town of Gizhaki. The Maraza plateau is separated from the Sundu by a gentle ledge, complicated by a relatively narrow Kalidzhan Ridge, with a maximum height of 1078 m, elongated in a northwestern direction. To the east of the Sundu plateau, the Akhundagh, Shimshabi, Kayblar, and others Ranges stand out. On the watershed of the latter, the Kayblar and Shayblar Peaks stand out, which have steep southern slopes (completely cut by gullies) and gently-sloping northern ones. To the east of the Kayblar Ridge, near the area of Dzhanghi, the Buransyz-Dzhulgin Valley begins, adjoining the gorge of the same name and extending in a south-easterly direction to the Gishlag (wintering place) of Buransyz. To the west of the Buransyz-Dzhulgin Valley, the ridges and uplands of At-Yal, Sungurdagh, Baygushgaya, and others, dissected by ravines, stand out. At the foot of the At-Yal Mountain, a deep winding ravine with numerous branches originates, which runs parallel to the left channel of the Jeyrankechmez River. The At-Yal Ridge and a series of plateaus located to the south of it are separated from South Gobustan by the wide

Jeyrankechmez depression (distinguished in the literature as South-East Gobustan). In the west, the Galandartapa, Umbaki, and Zakirtapa Ridges and the Sherbetdagh-Gochigaya-Nardaran monoclinical Range, with a height of about 600-700 m, border the Jeyrankechmez depression. A characteristic feature

of the Jeyrankechmez depression is a calmer landform, in some places complicated by several large and isolated mud volcanoes: Toraghay, Boyuk Kanizadag, Kichik Kanizadag, Aghtepe, Davalidagh, etc. All these large orographic units, against the background of adjacent valleys, are mud volcanoes (Figure 1).

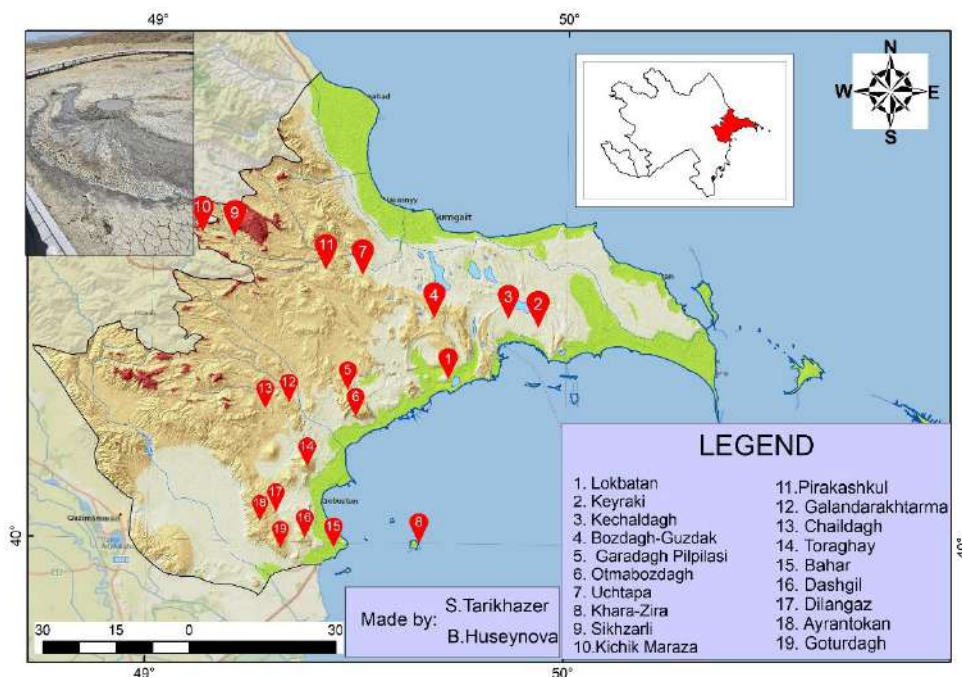


Fig. 1. Mud volcanoes in the Jeyrankechmez depression

The Pritoroghay Valley is distinguished to the west of the Aghtepe and Kanizadag uplands, which is filled with synclinally occurring Absheron deposits. In the northern part of the valley, narrowing, the Davalidagh upland goes around from the west and connects with the valley of a deep ravine, extending in a latitudinal direction and originating far to the northeast, in the area of the Sundi nomad camp. In the northwest, the Pritoroghay Valley is limited by the Galandartapa upland and the northeastern slopes of the At-Yal Ridge. In the central part of this valley, a large mud volcano Toraghay (400 m) rises in the form of a truncated cone. The slopes of this upland are strongly dissected by narrow and deep ravines radially diverging from the centre, forming a badland. Between the ravine, located at the foot of the city of At-Yal, and the valley of the Jeyrankechmez River, a “monumental” remnant rises above the surrounding plain - the Gushgaya Mountain, with a relative height of 50 m. The layers that make up the Gushgaya Mountain are an alternation of dense clays and sands, occurring almost horizontally, since the Gushgaya Mountain is located in the middle part of the Gushgaya syncline, which can be traced in the northwest-southeast direction.

The largest orographic element of South Gobustan is the Alat ridge, which stretches from the

northwest to the southeast for a distance of 50 km. The width of this ridge varies between 5-7 km. It begins in the northwest in the area of the Gungormaz Gorge and is the southeastern branch of the Langabiz Ridge. The northeastern slope of the Alat Ridge is gently sloping and dissected by gullies and ravines directed towards the Jeyrankechmez depression. The southwestern slopes are very steep, precipitous in places, heavily dissected by transverse ravines descending towards the Navagin valley.

The **lowland zone** within Gobustan stretches in a narrow strip along the coast of the Caspian Sea. Its landforms are characterised by high and medium-altitude remnants of marine terraces, giving the territory the character of hilly-wavy, abrasion-accumulative, and slightly dissected plains covered with aeolian deposits in the form of superimposed sand ridges and dunes.

In the course of the study, using the method of expert-statistical assessments of the distribution area (intensity) of morphogenetic processes, a map-scheme distribution of morphogenetic processes and landforms of the territory of Gobustan (Figure 2). Separated zones are individually characterised by varying degrees of ecogeomorphological hazard, and some morphogenetic processes there pose a real threat to tourist and recreational activities. The

structure of morphogenetic land-forming processes within the selected zones is given in the form of a diagram (Figure 3).

An analysis of modern dangerous land-forming processes in the study area, the mountain system, which is currently being intensively developed for

the development of tourism, etc., makes it possible to conclude that the most dangerous processes in Gobustan are earthquakes, mud volcano eruptions, landslides, mudflows, etc. All these processes form the general morphodynamic tension (Karimov, Tarikhazer, Karimova, 2023).

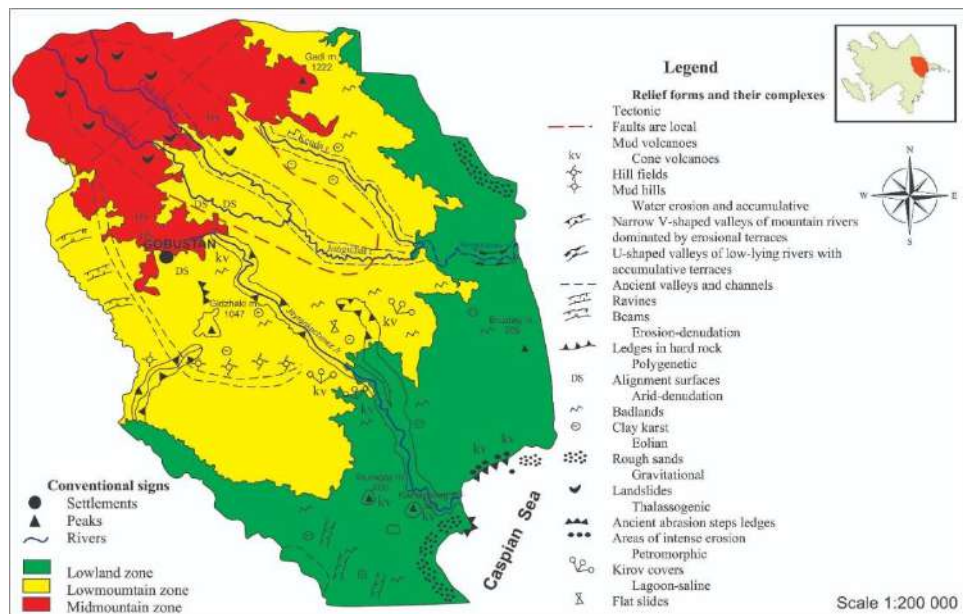


Fig. 2. Map-scheme of the zoning of the territory of Gobustan according to the distribution of morphogenetic processes and landforms (drawn up Tarikhazer, 2023)

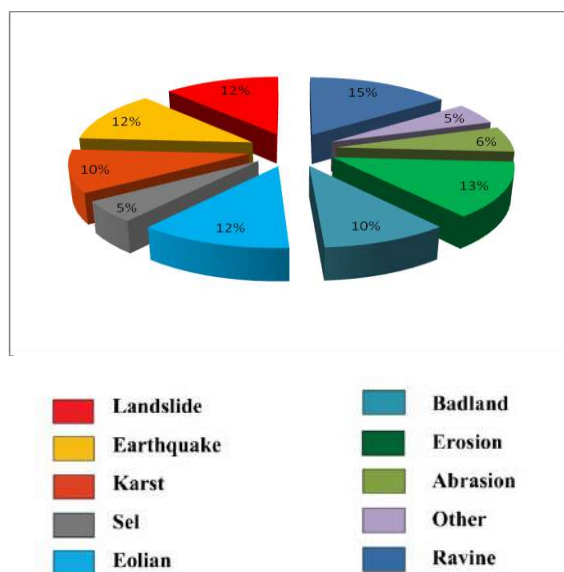


Fig. 3. Structure of morphogenetic processes within Gobustan

One of the most significant risk factors recorded within Gobustan is landslide and mudflow processes. They increase morphodynamic tension, which damages settlements, as well as tourist and recreational infrastructure (Tarikhazer, 2020, 2022_a).

In many parts of this region, landslides are fixed on mountain slopes and sea terraces. This is evidenced by the badlands and clayey karst developed here. Landslides, in the region activate when atmo-

spheric precipitation exceeds the average annual norms - up to 400 mm (on the territory of Azerbaijan, the minimum average annual precipitation, i.e., less than 150-200 mm, falls on the southeastern part of Gobustan). In our opinion, the climatic conditions of Gobustan practically cannot be the main factor in the manifestation of landslides. Here, the main role is played by geological and geomorphological factors, and in recent years - the activation of the anthropo-

genic factor. Most landslides are developed in the river basin of Pirsatchay, in the upper and middle reaches of the tributaries of the Sumgayitchay River (Gozluchay, Chikilchay, and Tudar Rivers). For example, the Sarydash landslide stream is developed in the river basin of Gozluchay, 2-2.5 km long and 1 km wide. Landslide processes were also actively developing on 106-111 km of the Baku-Shamakhi highway (length 122.7 km) (Figure 4; Figure 5). In recent years, due to anthropogenic pressure, landslides have intensified in the settlements of Gobustan (Table 1).

In the course of the study, we carried out a comparative analysis of landslide processes based on B.A. Budagov's research [1973] with the results of our data based on the interpretation of colour ACIs of 1996 and 2000-2020, with a scale of 1:60000 and field studies. It was revealed that over the past 50 years, the area of Gobustan, subject to landslide processes, has increased by 1.5-2 times. For example, it has expanded from 2.5 ha to 4.8 ha in the village of Gurbanchi; and from 4.2 ha to 6.1 ha in the villages of Poladly and Jahirli.

The rivers of the territory of Gobustan, which include Sumgayitchay, Pirsatchay, and Jeyrankechmez Rivers, are mud-bearing, with possible floods throughout the year, the catchment areas of which are located at a low altitude (up to 2700 m). In connection with the high-altitude position of watersheds, the main role in the formation of river runoff belongs to rains, which make up 50-60%. The snow cover on the watersheds of the rivers is short, and their share in the annual runoff varies within 5-15%. Groundwater feeding on rivers reaches 20%. The sources of mudflow formation on the rivers of Gobustan are confined to the height of 800-1000 m. A characteristic feature of the upper part of the mudflow basins is the presence of predominantly argillaceous shales in the surface layers of old screes. During dry periods, this material occupies large areas within mudflow centres, which becomes wet during heavy rains, turns into mud, and flows down slopes in the form of

streams. Mud streams merge and flow into the riverbed (Table 2) (Figure 6).

In the study area, non-structural mudflows are observed, the nature of the formation and passage of which is influenced by the orographic features of the territory (Guliyeva, Tarikhazer, Kuchinskaya, Karimova, 2019). Due to geological, geomorphological, soil and plant factors, as well as the aridity of the climate, there are favourable conditions for the manifestation of mudflow processes (Table 3).

The detailed study of the dynamics of the development of mudflow sources, the features of the accumulation of mudflow materials and their readiness for demolition, the study of the nature of changes in river beds, the state of banks and protective structures (currently one of the main measures is the construction of mudflow protection dams), potential routes of mudflows, and, on this basis, carrying out ecological and geomorphological measures to stabilize the environmental situation are of great importance. Therefore, timely information about the threat of the development of such dangerous morphogenetic processes as landslides and mudflows will significantly reduce the risk and amount of damage from these processes (Tarikhazer, 2020_a, 2022_b).

A map of the morphodynamic tension of Gobustan was compiled (Figure 7) as a result of a detailed study of the accumulated information and data extracted in the field and on the basis of decoding the ACI, as well as taking into account mudflow and landslide manifestations and under the condition of morphometric tension.

The area of the weak stress zone (I b.) makes 298.81 ha (53.4%), the area of the medium stress zone (II b.) is 217.67 ha (38.9%), while the area of the stress zone (III b.) equals to 43 ha (7.7%).

The deepening of morphodynamic processes expresses a real impact on the stability of mountain geosystems and exacerbates their anthropogenic impact (Karimov, Tarikhazer, Karimova, 2023).

The map of the morphodynamic intensity of Go-



Fig. 4, 5. Landslide phenomenon at 106 km of the Baku-Gobustan-Shamakhi road (photo November 12, 2015, Tarikhazer)

Table 1

Dates of manifestation of the most dangerous landslide processes in Gobustan for 2001-2021

№	Date of landslide manifestation	Landslide parameters	Consequences of the landslide
1	2	3	4
1.	April 2001	Length 100-110 m, width 20-15 m	The landslide occurred in the village of Tekla Mirzababaly at an altitude of 800-1000 m and slides into the valley of the Khalkhachay River
2.	April-May 2003	Length 800 m, width 200-220 m	A landslide is developed in the northern part of the village of Jeirli. Locally, 3 landslides appeared
3.	October 2003	Length 600, width 320 m	Landslides appeared in the central and western parts of the village of Jeirli. Numerous landslide cracks are developed
4.	April 2004	Length 400-1000 m, width 800 m	The landslide is developed at an altitude of 880-1050 m in the central part of the village of Gurbanchi
5.	April 2006	Length 300-320 m, width 40-70 m	Intensification of a landslide at an altitude of 950-1000 m in the village of Chalov
6.	October 2006	Length 600 m, width 320 m	Intensification of a landslide in the northern part of the village of Jeirli at an altitude of 920-1000 m
7.	October 2008	Length 380 m, width 90-1000 m	Intensification of a landslide in the western part of the village of Chalov
8.	April 6, 2012	Length 150-180 m, width 30 m	In the village of Gobustan, ancient rock paintings and pre-historic caves of the Gobustan State Reserve were under threat
9.	Nov. 12, 2015	Cracks with a width of 2-5 cm, a length of 1.5-2 m were formed on the asphalt pavement	Part of the Baku-Gobustan-Shamakhi roadway collapsed at 106 km. Asphalt Road sagged in several places. Deformation occurred on the supporting wall
10.	June 3, 2016	Length 60 m, width 30-35 m	At 106-107 km of the Gobustan-Shamakhi highway, numerous cracks appeared. Traffic was blocked. Traffic was blocked
11.	Oct. 19, 2016	Length 100 m, width 60 m	Cracks appeared in 3 residential buildings of Gobustan settlement
12.	Nov. 14, 2016	Length 110-115 m	Communication with 4 settlements of Gobustan district is blocked
13.	Dec. 19, 2016	Cracks with a width of 2-3 cm, a length of 1-1.5 m were formed on the asphalt pavement	Baku-Gobustan-Shamakhi highway traffic blocked for 109-110 km
14.	Feb. 17, 2017	Length 40-45 m	Activating a landslide. The Gobustan-Shamakhi Road sank to a depth of 40-50 cm for 105 km
15.	July 21, 2017	Cracks with a width of 3-4 cm, a length of 0.5-1 m were formed on the asphalt pavement	A landslide intensified at 106-107 km of the Baku-Gobustan-Shamakhi highway. Asphalt sagged in two places
16.	Aug. 28, 2017	Cracks with a width of 5-6 cm, a length of 1-1.5 m were formed on the asphalt pavement	A landslide intensified at 106-107 km of the Baku-Gobustan-Shamakhi highway.
17.	Sept. 12, 2017	Length cracks with a width of 2-3 cm, a length of 1 m were formed on the asphalt pavement	A landslide intensified at 106-107 km on the Baku-Gobustan-Shamakhi highway. Traffic blocked
18.	Oct. 19, 2017	Cracks appeared on the asphalt pavement with a length of 2-3 m, a depth of 10-20 cm, in some places up to 30 cm	The asphalt of the Baku-Gobustan-Shamakhi Road has sagged in some places. Traffic blocked
19.	24 April 2018	There were numerous cracks 1-2 cm wide of the roadway	Landslide-subsidence phenomena are developed on the Baku-Gobustan-Shamakhi highway. Road signs installed along the road overturned for 107-109 km.
20.	Feb. 5, 2019	There were numerous cracks 1-3 cm wide of the roadway	On the 111-115 km of the Baku-Gobustan-Shamakhi highway, subsidence and landslide processes are observed in several places
21.	June 24, 2020	Numerous cracks are wide 5-7 cm	In the village of Poladly, a six-meter recently repaired rural road was damaged
22.	March 31, 2021	Length 80-90 m, width 50 m	In the village of Jeirli, small cracks formed on the walls of more than 40 houses. As a result of the landslide, two residential buildings were in disrepair

Source: Compiled by Tarikhazer (2023)

Table 2

Mudflow-bearing River basins of Gobustan

River	Total area of the river Pool (km ²)	Basin area (before exit to the take-out cone) (km ²)	Total formation of debris foci (km ²)	Area of formation of mudflow foci before reaching the take-out cone (%)
1	2	3	4	5
Sumgaitchay	1750	1500	260	17.3
Pirsaatchay	2280	995	193	19.4
Jeyrankechmez	896	412	245	59.5



Fig. 6. Debris, formed as a result of a mudflow that occurred on the Sumgayitchay river, May 21, 2010 (Photo was taken by Tarikhazer)

bustan will allow revealing the modern commitment to the flow of specific processes, predicting, and weighing the threat coming from dangerous morphodynamic processes, which with each new case take on all the impressive relevance and tension in the study area.

Scientific novelty and practical significance.

For the first time, a tourist and recreational analysis of the landforms of Gobustan were carried out, which makes it possible to identify favourable and unfavourable zones for the construction of the necessary infrastructure and the development of certain types of tourism. In the zones (in Figure 6, these are weak (I b.) and medium stressed (II b.) territories), which have favourable geological and geomorphological conditions, it is possible to create cycling, horseback, camel, pedestrian modes of transport. The presence of the Gobustan Reserve here fits perfectly into the concept of ecotourism development in Azerbaijan, which is given great attention at the state level. With minimal financial costs and with minimal intrusion into nature, several areas of ecotourism can be developed at once - scientific, adventure, historical. In a zone characterized by unfavourable (tense territory - III b.) geological and geomorphological conditions, it is possible to contemplate unusual mud volcanic landscapes from above. To do this, it is enough to organize points for paragliding, gliders and gyroplanes, balloon flights and helicopters.

The data obtained can serve as an information

base for future scientific research on patterns of development of destructive morphogenetic processes in the mountainous geosystems of the Greater Caucasus and in the countries of the Alpine-Himalayan belt, for the rational use of the territory, solving ecogeomorphological problems and ensuring the safety of living and life in populated areas, preventing the risk of manifestation of dangerous processes in the further development of the mountainous areas for the purposes of recreational and tourist development. Anthropogenic factors in the transformation of the nature of the coastal zones of the Caspian Sea cause the activation or emergence of dangerous morphogenetic processes that increase as the anthropogenic load on geosystems increases. The study of anthropogenically caused dangerous morphogenetic processes to establish their qualitative and quantitative characteristics is necessary to predict the likely consequences of human use of natural resources and develop principles for optimising their use. The compiled map-scheme of the morphogenetic processes and landforms zoning of Gobustan and the map of the morphodynamic tension allow assessing the real threat from dangerous morphogenetic processes, the consideration of which will allow carrying out preventive measures during tourist and recreational development.

Conclusion. The results of studying the morphodynamic processes of the Gobustan for the purposes of tourism and recreation analysis can be used

Table 3

Dates of passage of the most dangerous mudflows on the rivers of Gobustan for 1960-2020

№	Name of the river	Date of the mudslide	Causes of mudflow	Aftermath of mudslide
1	2	3	4	5
1.	Pirsaatchay	21.04.1960	Rains	Flooded land plots of the city of Shamakhi
2.	Sumgaitchay	20.08.1962	Heavy rains	Flooded land plots and gardens in the lower part of the village of Gochalar
3.	Sumgaitchay	06.07.1963	Rains	Significant areas of land between the city of Sumgayit and the village of Pirbeyli were flooded
4.	Sumgaitchay	23.04.1966	Rains	Significant areas of land between the city of Sumgayit and the village of Pirbeyli were flooded
5.	Sumgaitchay	27.04.1967	Rains	Land plots flooded in the lower part of the village of Cosalar
6.	Pirsaatchay	06.06.1968	Long term rains	The land areas of the city of Shamakhi and the village of Gubaly were flooded. Bridge across Baku-Shamakhi Road destroyed
7.	Sumgaitchay	07.06.1968	Rains	Sown areas and gardens are flooded. Pirbeili and Hilmilli
8.	Jeyrankechmez	06.06.1972	Rains	Flooded land areas near Sangachal station
9.	Pirsaatchay	14.06.1975	Rains	Small areas of the city of Shamakhi flooded
10.	Sumgaitchay	21.05.2010	Long term rains	Flooded household plots of Hillmilli village (<i>Fig. 5.</i>)
11.	Pirsaatchay	17.05.2017	Rains	In the village of Poladly, mudflow waters filled the basements of private residential buildings, more than 200 heads of poultry died
12.	Jeyrankechmez	02.06.2017	Heavy rains	A 76-km section of the Baku-Shamakhi Road was damaged. Mudflow disabled the bridge on this section of the road. As a result, a traffic jam of more than 500 cars formed on the road. A VAZ-2106 car was carried away by a mudflow. Cars stuck in the silt and water were recovered by rescuers. Heavy equipment was brought to the scene, the channel of the Jeyrankechmyaz River was cleared of silt, the flow of mudflows in a different direction was ensured.
13.	Jeyrankechmez	14.04.2019	Rains	Mudflows also destroyed an alternative road leading to the village of Tesi.
14.	Pirsaatchay	12.07.2010	Heavy rains	The mudflow in the village of Poladly caused serious damage to the villagers. More than 20 private houses were flooded, rural roads were destroyed, streets were covered with a thick layer of silt. The mudslide destroyed a small bridge over the Pirsaatchay River, damaged a large bridge, washing away one of the supports. As a result of the disaster, gas pipeline, electricity and communication lines failed, poles and trees were felled.
15.	Jeyrankechmez	15.07.2020	Long term rains	Mudflow flooded houses and land plots in the village of Yekakhan, internal roads fell into disrepair, the movement of cars is difficult
16.	Pirsaatchay	12.07.2020	Heavy rains	Serious damage was caused to the residents of the village of Poladly. More than 20 private houses were flooded, rural roads were destroyed, streets were covered with a thick layer of silt. The mudslide destroyed a small bridge over the Pirsaatchay River, damaged a large bridge, washing away one of the supports. As a result of the disaster, gas pipeline, electricity and communication lines failed, poles and trees were felled. In the village of Ekyakhana, a mudflow flooded houses and land plots, internal roads became unusable, the movement of cars is difficult

Source: Compiled by Tarikhazer (2023)

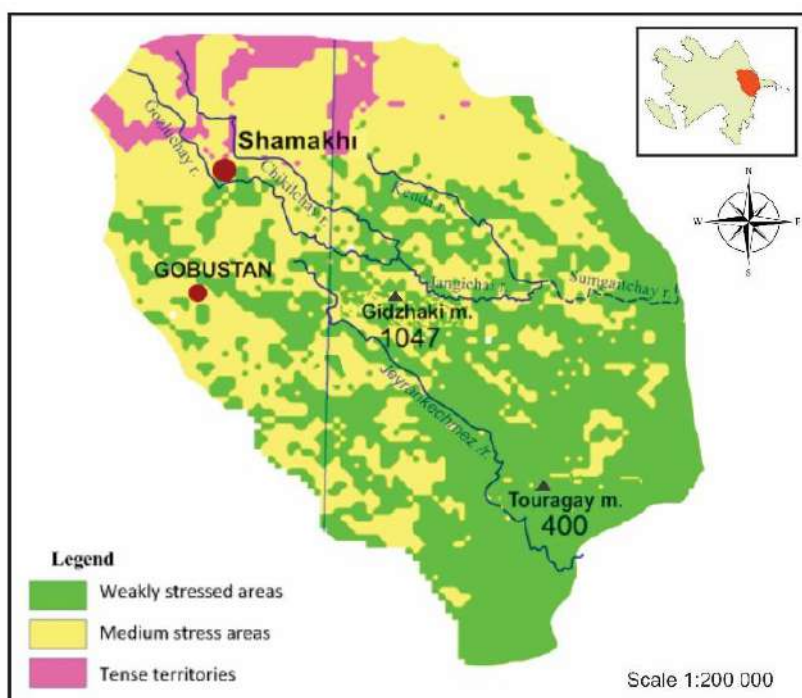


Fig. 7. Map of morphodynamic intensity of Gobustan (drawn up by Tarikhazer, 2023)

in the future to research and formulate more detailed investment projects for developing tourism in the territory of the Gobustan National Geopark.

In addition, the results of fieldwork confirmed the results obtained using GIS technologies. It should be noted that:

— In the development of existing methods for assessing the development of dangerous morphogenetic processes, the use of expert statistical estimates of the area of distribution (intensity) of the process in the geoecological region is justified. The given method and interpretation of multi-scale and multi-temporal ACI can significantly increase the reliability of the assessment and prediction of dangerous morphogenetic processes, confirmed by practical results.

— Anthropogenic factors in the transformation of the nature of the mountainous geosystems of the Greater Caucasus serve as an additional and sometimes the main reason for the activation or occurrence of certain processes of land formation. As the anthropogenic load increases on unstable mountain geocomplexes, the morphodynamic stresses caused by this load increase. Therefore, it is considered

necessary to expand research further to identify the nature of the impact of the anthropogenic factor on land-forming processes to establish not only their qualitative but also their quantitative characteristics, without which it is impossible to predict the likely consequences of human use of natural resources and develop principles for optimizing their use for purposes of tourism and recreational development.

— To reduce the danger to human life, tourist sites, etc., it is necessary to carry out a preliminary large-scale expert analysis of the eco-geomorphological situation within the selected zones before planning the creation of a National Geopark with international significance in the territory of Gobustan.

The reliability of the results of the study and the zoning of the territory of the Gobustan according to the distribution of morphogenetic processes and landforms is confirmed by the current practice: functioning objects (Gobustan State Historical and Art Reserve - Museum of Petroglyphs) within the study area is located in zones with favorable geological and geomorphological conditions. Nevertheless, we believe that the landforms of a larger area of the study area can be classified as “best” for organized recreation.

Bibliography

1. Baynes, F. J., Lee, I. K., & Stewart, I. E. (2002). A study of the accuracy and precision of some landslide risk analyses. *Australian Geomechanics*, 37, 149–156.
2. Brardinoni, F., Slaymaker, O., & Hassan, M. A. (2003). Landslide inventory in a rugged forested watershed: Comparison between air-photo and field survey data. *Geomorphology*, 54, 179–196.
3. Briggs, A., Dowling, R., & Newsome, D. Geoparks – learnings from Australia. *Journal of Tourism Futures*. 9, 3, 351–365. <https://doi.org/10.1108/JTF-11-2020-0204>
4. Brilha, J. (2018). Geoheritage and geoparks. In E. Reynard & S. Brilha (Eds.). *Geoheritage: Assessment, protection, and management* (323–335). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809531-7.00018-6>

5. Будагов Б. А. (1973). Геоморфология и новейшая тектоника Юго-Восточного Кавказа. Баку, 245.
6. Будагов Б.А., Ализаде Э.К., Тарихазер С.А. (2005). Современные тенденции развития природных деструктивных процессов и оценка эколого-геоморфологической опасности (на примере южного склона Большого Кавказа). В сборнике трудов научно-практической конференции «Природные деструктивные явления и эколого-географические проблемы развития Шеки-Закатальского региона». Баку, 25–28.
7. Cantarino, I., Carrion, M. A., Goerlich, F., & Martinez Ibañez, V. A. (2019). ROC analysis-based classification method for landslide susceptibility maps. *Landslides*, 16(2), 265–282. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1063-4>
8. Castellanos Abella, E. A., & Van Westen, C. J. (2008). Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: A case study from San Antonio del Sur, Guantánamo, Cuba. *Geomorphology*, 94, 453–466.
9. Chacon, J., Irigaray, C., Fernandez, T., et al. (2006). Engineering geology maps: Landslides and geographical information systems. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(4), 341–411.
10. Corominas, J., van Westen, C. J., Frattini, P., et al. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73, 209–263.
11. Guliyeva, S. Y., Tarikhazer, S. A., Kuchinskaya, I. Y., & Karimova, E. J. (2019). Natural and anthropogenic factors in hazard assessment of the Alpine-Himalayan montane ecosystems (at the example of the Azerbaijan Caucasus). *Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences*, 72(9), 1227–1233. <https://doi.org/10.7546/CRABS.2019.09.10>
12. Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., & Ardizzone, F. (2005). Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*, 72(1), 272–299. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.002>
13. Imrani, Z. T., Veliyeva, G. V. (2021). Methodological basis of zoning of tourism-recreation reserves and tourism potential of Gusar region of the Republic of Azerbaijan. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 30(2), 379–388. <https://doi.org/10.15421/112134>
14. Imrani, Z. T., Veliyeva, G. V. (2023). Regionalization of resort-recreational zones of Azerbaijan and possibilities of using them: Case study – Gusar tourism-recreational zone. *Universidad y Sociedad*, 5(3), 54–56.
15. Imrani, Z. T., Huseynzade, A. I., & Bilalov, B. A. (2024). Priority development areas of nature tourism resources in Shaki-Zagatala economic and geographic region. *Geojournal of Tourism and Geosites*, 54(2spl), 921–926. <https://doi.org/10.30892/gtg.542spl16-1267>
16. Керимов, Г.А., Тарихазер, С.А., Керимова, Э.Д. (2023). Гобустан: Геоморфологические условия и ресурсы. Баку, 297/
17. Kuhn, C., Santos, F., Jesus, C., Kolya, A., & Reis, F. (2022). Public policies for geodiversity in Brazil. *Geoheritage*, 14(2), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s12371-022-00705-9>
18. Lee, S., Pradhan, B. (2007). Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides*, 4, 33–41.
19. Lukáč, M., Štraba, L., Čerhega, A., & Khouri, S. (2021). Recent state policy and its impact on geopark establishment and operation in Slovakia. *Land*, 10, 1069–1086. <https://doi.org/10.3390/land10101069>
20. Niemets, L., Kandyba, Y., Kobylín, P., Kostrikov, S., Dobrovol'skaya, N., & Telebienieva, I. (2021). Integral assessment of ethnic tourism in Ukraine: Resource provision and regional features. In “Proceedings of the 37th International Business Information Management Association Conference (IBIMA)” (2077–2083). <https://u.pchoud.link/public-link/showcode=kZnoamXZkmWu5WL4oKu11pU17owucy5MxBfk#folder=9238065447@tpl=publicfoldergrid>
21. Oh, H.-J., Lee, S. (2011). Cross-application used to validate landslide susceptibility maps using a probabilistic model from Korea. *Environmental Earth Sciences*, 64, 395–409.
22. Roccati, A., Paliaga, G., Luino, F., Faccini, F., & Turconi, L. (2021). GIS-based landslide susceptibility mapping for land use planning and risk assessment. *Land*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/land10020162>
23. Schlögel, R., Doubre, C., Malet, J.-P., et al. (2015). Landslide deformation monitoring with ALOS/PALSAR imagery: A DInSAR geomorphological interpretation method. *Geomorphology*, 231, pp. 314–330.
24. Shimshek, O. (2020). Nahcivan Düzdağ'ın sağlık turizmi potansiyeli. *Kafkas Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 25, 21–38
25. Tarikhazer, S. A. (2020). The geographical prerequisites for the identification and prevention of dangerous geomorphological processes in the mountain geosystems of the Alpine-Himalayan belt (on the example of the Major Caucasus of Azerbaijan). *Dnepropetrovsk University Bulletin. “Series: Geology, Geography and Geoecology”*, 1, 176–187. <https://doi.org/10.15421/112016>
26. Tarikhazer, S. A. (2022a). Assessment of ecological 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. Тарихазер, С.А. (2022б). Геолого-геоморфологический анализ оползневых процессов в заповеднике «ГОбУ-СТАН» в целях туристско-рекреационной деятельности. *География и водные ресурсы (Казахстан)*, 2, 19–27.
28. Tovisetkul, C. P., Lengvttaya, J., Verathanatchakul, T., & Benjaku, S. (2021). The development of the law for management the geopark of Thailand. *Journal of Politics, Administration and Law*, 11–37.
29. Warnes, D. J. (1981). Slope movements, types, and processes. In R. Schuster & R. Krizek (Eds.), *Landslides: Investigation and remediation*, 32–77.
30. Yaholnyk, V., Manyuk, V. V. (2017). Legal aspects of creating geoparks in Ukraine. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 136–145. <https://doi.org/10.15421/111729>
31. Zouros, N. C. (2008). European Geoparks Network: Transnational collaboration on Earth heritage protection, geotourism and local development. *Geoturystyka*, 1(12), 3–22.

References

1. Baynes, F. J., Lee, I. K., & Stewart, I. E. (2002). A study of the accuracy and precision of some landslide risk analyses. *Australian Geomechanics*, 37, 149–156.
2. Brardinoni, F., Slaymaker, O., & Hassan, M. A. (2003). Landslide inventory in a rugged forested watershed: Comparison between air-photo and field survey data. *Geomorphology*, 54, 179–196.
3. Briggs, A., Dowling, R., & Newsome, D. Geoparks – learnings from Australia. *Journal of Tourism Futures*. 9, 3, 351–365. <https://doi.org/10.1108/JTF-11-2020-0204>
4. Brilha, J. (2018). Geoheritage and geoparks. In E. Reynard & S. Brilha (Eds.). *Geoheritage: Assessment, protection, and management* (323–335). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809531-7.00018-6>
5. Budagov, B. A. (1973). Geomorphology and recent tectonics of the South-East Caucasus. *Baku*, 245.
6. Budagov, B. A., Alizade, E. K., & Tarikhazer, S. A. (2005). Modern trends in the development of natural destructive processes and assessment of ecogeomorphological hazard (using the example of the southern slope of the Greater Caucasus). In *Proceedings of the scientific-practical conference “Natural destructive events and ecological-geographic development problems of the Sheki-Zaqatala region”*. Baku, 25–28.
7. Cantarino, I., Carrion, M. A., Goerlich, F., & Martinez Ibañez, V. A. (2019). ROC analysis-based classification method for landslide susceptibility maps. *Landslides*, 16(2), 265–282. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1063-4>
8. Castellanos Abella, E. A., & Van Westen, C. J. (2008). Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: A case study from San Antonio del Sur, Guantánamo, Cuba. *Geomorphology*, 94, 453–466.
9. Chacon, J., Irigaray, C., Fernandez, T., et al. (2006). Engineering geology maps: Landslides and geographical information systems. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(4), 341–411.
9. Corominas, J., van Westen, C. J., Frattini, P., et al. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73, 209–263.
10. Guliyeva, S. Y., Tarikhazer, S. A., Kuchinskaya, I. Y., & Karimova, E. J. (2019). Natural and anthropogenic factors in hazard assessment of the Alpine-Himalayan montane ecosystems (at the example of the Azerbaijan Caucasus). *Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences*, 72(9), 1227–1233. <https://doi.org/10.7546/CRABS.2019.09.10>
11. Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., & Ardizzone, F. (2005). Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*, 72(1), 272–299. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.002>
12. Imrani, Z. T., Veliyeva, G. V. (2021). Methodological basis of zoning of tourism-recreation reserves and tourism potential of Gusar region of the Republic of Azerbaijan. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 30(2), 379–388. <https://doi.org/10.15421/112134>
13. Imrani, Z. T., Veliyeva, G. V. (2023). Regionalization of resort-recreational zones of Azerbaijan and possibilities of using them: Case study – Gusar tourism-recreational zone. *Universidad y Sociedad*, 5(3), 54–56.
14. Imrani, Z. T., Huseynzade, A. I., & Bilalov, B. A. (2024). Priority development areas of nature tourism resources in Shaki-Zaqatala economic and geographic region. *Geojournal of Tourism and Geosites*, 54(2spl), 921–926. <https://doi.org/10.30892/gtg.542spl16-1267>
15. Karimov, G. A., Tarikhazer, S. A., & Karimova, E. J. (2023). Gobustan: Geomorphological conditions and resources. *Baku*, 297.
16. Kuhn, C., Santos, F., Jesus, C., Kolya, A., & Reis, F. (2022). Public policies for geodiversity in Brazil. *Geoheritage*, 14(2), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s12371-022-00705-9>
17. Lee, S., Pradhan, B. (2007). Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides*, 4, 33–41.
18. Lukáč, M., Štraba, L., Čerhega, A., & Khouri, S. (2021). Recent state policy and its impact on geopark establishment and operation in Slovakia. *Land*, 10, 1069–1086. <https://doi.org/10.3390/land10101069>
19. Niemets, L., Kandyba, Y., Kobylín, P., Kostrikov, S., Dobrovolskaya, N., & Telebienieva, I. (2021). Integral assessment of ethnic tourism in Ukraine: Resource provision and regional features. In “Proceedings of the 37th International Business Information Management Association Conference (IBIMA)” (2077–2083). <https://u.pchoud.link/public-link/showcode=kZnoamXZkmWu5WL4oKu1pU17owucy5MxBfk#folder=9238065447@tpl=publicfoldergrid>
19. Oh, H.-J., Lee, S. (2011). Cross-application used to validate landslide susceptibility maps using a probabilistic model from Korea. *Environmental Earth Sciences*, 64, 395–409.
20. Roccati, A., Paliaga, G., Luino, F., Faccini, F., & Turconi, L. (2021). GIS-based landslide susceptibility mapping for land use planning and risk assessment. *Land*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/land10020162>
21. Schlögel, R., Doubre, C., Malet, J.-P., et al. (2015). Landslide deformation monitoring with ALOS/PALSAR imagery: A DInSAR geomorphological interpretation method. *Geomorphology*, 231, 314–330.
22. Shimshek, O. (2020). Health tourism potential of Duzdag Nahcivan. *Kafkas University Journal of the Institute of Social Sciences*, 25, 21–38. <https://doi.org/10.9775/kausbed.2020.002> [in Turkish].
23. Tarikhazer, S. A. (2020). The geographical prerequisites for the identification and prevention of dangerous geomorphological processes in the mountain geosystems of the Alpine-Himalayan belt (on the example of the Major Caucasus of Azerbaijan). *Dnepropetrovsk University Bulletin. “Series: Geology, Geography and Geoecology”*, 1, 176–187. <https://doi.org/10.15421/112016>
24. Tarikhazer, S. A. (2022a). Assessment of ecological 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>

25. Tarikhazer, S. A. (2022b). Geological and geomorphological analysis of landslide processes in the reserve "GO-BUSTAN" for the purpose of tourist and recreation activities. *Geography and Water Resources (Kazakhstan)*, 2, 19–27. <https://doi.org/10.55764/2957-9856/2022-2-19-27.09>
26. Tovisetkul, C. P., Lengvtaya, J., Verathanachakul, T., & Benjaku, S. (2021). The development of the law for management the geopark of Thailand. *Journal of Politics, Administration and Law*, 11–37.
27. Warnes, D. J. (1981). Slope movements, types, and processes. In R. Schuster & R. Krizek (Eds.), *Landslides: Investigation and remediation*, 32–77.
28. Yabolnyk, V., Manyuk, V. V. (2017). Legal aspects of creating geoparks in Ukraine. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 136–145. <https://doi.org/10.15421/111729>
29. Zouros, N. C. (2008). European Geoparks Network: Transnational collaboration on Earth heritage protection, geotourism and local development. *Geoturystyka*, 1(12), 3–22.

Морфодинамічні процеси в прибережній зоні Каспійського моря (Гобустан, Азербайджан): поширення та ризики прояву

Стара Таріхазер

д. геогр. н., доцент, гол. наук. співробітник,
Інститут географії імені академіка Г.А. Алієва
МОН Азербайджану, Баку, Азербайджан

Метою даного дослідження є аналіз небезпечних морфогенетичних процесів з урахуванням активного розвитку туристично-рекреаційної діяльності в південно-східній частині Великого Кавказу. Важливість цієї проблеми полягає в тому, що на території Гобустану планується створення Національного геопарку міжнародного значення. На основі власних польових геолого-геоморфологічних досліджень, фондового і картографічного матеріалу, а також з використанням аерокосмічних знімків (АКЗ) 1996, 2000-2020 рр. в масштабі 1: 60 000 вперше виявлені території морфогенетичної напруженості Гобустану. час. При цьому виділено найбільш небезпечні процеси (зсуви, селеві потоки), а також морфометрію рельєфу (вертикальну та горизонтальну розчленованість, крутизна та оголення схилів). Території з характерними геолого-геоморфологічними умовами, де морфогенетичні процеси відрізняються за характером прояву та ступенем напруженості (слабо, помірно та напружено): площа слабонапруженої території (І б.) становить 298,81 га (53,4%), площа середньонапруженої території (ІІ б.) - 217,67 га (38,9%), площа напруженої території (ІІІ б.) - 43 га (7,7%). В результаті детального вивчення зібраної інформації та даних, район дослідження за характером поверхні і висот, а також за умовою морфометричної напруженості та з урахуванням різного ступеня морфогенетичної небезпеки територія Гобустану за розподілом морфогенетичних процесів і форм рельєфу районували: середньогір'я (з абсолютними висотами до 1300-1700 м), низовини (з абсолютними висотами до 800-1000 м) і низовинний пояс (з абсолютними висотами до 50-100 м). У цих зонах деякі морфогенетичні процеси становлять реальну загрозу для розгортання рекреаційно-туристичних заходів, виключно залежних від рельєфу, та зведення відповідної інфраструктури.

Результати досліджень дозволять використовувати отримані дані для розробки Програми безпечного та сталого функціонування та освоєння з метою рекреаційно-туристичного розвитку геосистем Азербайджану.

Ключові слова: морфометричні показники; морфогенетичні процеси; морфодинамічна напруга; небезпека; природний ризик; антропогенний вплив.

Надійшла 5 листопада 2024 р.
Прийнята 16 грудня 2024 р.

Characteristics of the contemporary spatiotemporal distribution of atmospheric precipitation in the southern and southeastern parts of the Greater Caucasus region

Jamal Huseynov¹

PhD (Geography),

¹ National Aviation Academy, Azerbaijan Airlines JSC, Baku, Azerbaijan,
e-mail: camalh434@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7878-578X>;

Allahverdi Tagiyev²

PhD Student, Researcher,

² Azerbaijan State Oil and Industry University, Ministry of Science and Education
of the Republic of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan,
e-mail: allahverdi.taghiyev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5526-3631>;

Mehriban Ismayilova²

PhD (Earth Sciences),

e-mail: mexribani@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9099-5237>

ABSTRACT

Problem definition. Currently, global warming, which is being observed on Earth, continues to show its numerous effects in the South Caucasus, as in all other regions. In the region, along with rising air temperatures, a number of climatic elements are changing their long-term patterns. One of the atmospheric phenomena most affected by climate change is precipitation. The article analyzes the modern spatiotemporal variations of atmospheric precipitation in the southern and southeastern parts of the Greater Caucasus region.

Formulation of the purpose. In previous studies, although the spatiotemporal distribution of atmospheric precipitation was determined, such research did not cover recent periods. This study was conducted to identify the effects of modern climate change on the spatiotemporal distribution of atmospheric precipitation in the southern and southeastern parts of the Greater Caucasus region. For this purpose, the distribution of precipitation indicators across months, seasons, years, and the Earth's surface, as well as their long-term trends, have been determined.

Research methods. The analysis utilized observational data on atmospheric precipitation collected from the hydrometeorological stations of Zaqatala, Oghuz, Shaki, Ismayilli, Shamakhi, Gabala, Gobustan, Saribash, and Alibay over the period from 1961 to 2023. The research was conducted using modern mathematical-statistical, physical, cartographic methods, and GIS technology. In the study, the analysis of extreme atmospheric precipitation events was conducted for the period 1961-2023 due to the probability of their recurrence, while the spatiotemporal distribution characteristics of precipitation (monthly, seasonal, annual, and surface-based) were examined during the modern climate change period, specifically from 1991 to 2023.

The main material. During the analysis, it was determined that the average long-term amount of atmospheric precipitation in the southern and southeastern parts of the Greater Caucasus region is 816 mm. Of the total annual precipitation in the region, 56% occurs during the warm period, while 44% falls during the cold period. In general, across this part of the region, the amount of precipitation decreases from higher elevations to lowlands and from the northwest to the southeast.

Conclusions. In the study area, a decrease in precipitation amounts is observed in all months except January, March, and May. The reduction in precipitation during the spring and summer months is particularly detrimental to the development of agricultural crops, as it coincides with their vegetation period. The precipitation in the region predominantly exhibits a recurrence of 120 mm or higher. The results of the research can be utilized for the establishment of new agricultural fields, the compilation of maps, economic assessments, and the development of mitigation measures against climate change.

Keywords: climate change, atmospheric precipitations, GIS technology, recurrence limit of precipitation, difference integral, moving average quantity, precipitation anomaly.

In cites: Huseynov Jamal, Tagiyev Allahverdi, Ismayilova Mehriban (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>

Problem definition. Precipitation is one of the main climate-forming factors on Earth and is of particular importance in the formation of ecosystems [17]. Precipitation formation culminates with cooling of water particles that have evaporated under high temperature conditions as they rise in the air column, condense into droplets on a small particles at a certain point, growing of the droplets by colliding, and the formation of Liesegang bands and their down-

ward movement [18, 22, 28].

The circulation of water on Earth is carried out by large and small water cycles. Such large cycles consist of the transport of large-volume moist air masses by mesoscale synoptic objects (cyclone, anticyclone, etc.) to longer distances [1, 4]. Small synoptic processes such as the transport of water by local winds to higher mountains evaporated from the surface of the Caspian Sea and the precipitation falling

there can be given as an example of small water cycles [7, 9].

Depending on the formation of atmospheric processes, precipitation is distributed unevenly on Earth in different amounts. Thus, in equatorial, temperate climatic zones dominated by descending air masses, the amount of precipitation is higher than in other zones [19, 20].

Climate change on Earth is already an accepted ecological crisis. The rapid expansion of its “warming” characteristics over the past 35 years is already an inevitable fact. Global warming is characterized by its different characteristics in different regions of the Earth [11, 13]. The increase in air temperature, possible evaporation indicators, the recurrence of dangerous atmospheric phenomena, the decrease in the volume of glacier areas, river flows and the amount of atmospheric precipitation are the effects of climate change in the territory of Azerbaijan [12, 13].

Analysis of recent research. The scientific explanation of the time-space distribution of atmospheric precipitation in the country was first reflected in the monograph of A.M. Shikhlinsky and A.A. Madatzade (1968). However, in subsequent periods, the number of such studies increased. In recent times, the study of various characteristics of precipitation in different regions has been reflected in the studies of scientists such as N.Sh. Huseynov, F.A. Imanov, S.H. Safarov, R.N. Mahmudov, A.S. Mammadov, K.S. Rahimov, H.S. Nabiyeu, J.S. Huseynov and others. In these studies, the monthly, seasonal, zonal distribution characteristics of precipitation, multi-year dynamics, amount of precipitation at various limits, etc. in the territory of the republic have been investigated [4, 13, 19].

Highlighting previously unsolved parts. Recent global warming has significantly influenced changes in various climatic elements. In this context, a reduction in precipitation amounts has been observed. Previous studies on the impacts of climate change on precipitation patterns across the country concluded by analyzing long-term precipitation dynamics and quantifying monthly variability through percentage deviations. Earlier research provided only generalized comparative analyses for Azerbaijan, contrasting the periods 1961-1990 and 1991-2020. However, comprehensive studies to characterize the contemporary precipitation regime—both for Azerbaijan as a whole and specifically for the Azerbaijani sector of the Greater Caucasus—have been lacking since 1968 [6, 8, 12, 13].

Formulation of the purpose. The aim of the study is to determine the modern characteristics of the temporal and spatial distribution of atmospheric precipitation in the southern and southeastern parts of the Greater Caucasus province.

This study incorporates the latest observational

data and employs statistical refinements to elucidate the modern spatiotemporal distribution patterns of precipitation across the southern and southeastern slopes of the Greater Caucasus mountain range within Azerbaijan. The specific mechanisms governing precipitation formation in this region have been analyzed in detail. The impacts of climate change on the precipitation regime were investigated using multiple methodologies [11, 15, 21], thereby enhancing the statistical reliability of the findings.

Research methods. The study was conducted on the basis of observation data on atmospheric precipitation from 9 hydrometeorological stations of the National Hydrometeorological Service operating in the southern and southeastern part of the Greater Caucasus province (Zagatala, Oghuz, Sheki, Ismayilli, Shamakhi, Gabala, Gobustan, Saribash and Alibay) in 1961-2023. Initial data were collected from periodic statistical and scientific publications of state agencies, internet resources and research data of individual scientists [7, 14, 25-28]. The analyses were conducted on monthly, seasonal and annual total precipitation indicators. Taking into account the possibility of recurrence of maximum and minimum monthly indicators of atmospheric precipitation, the study analyzed the period 1961-2023, and the modern spatial-temporal distributions were analyzed for the period 1991-2023.

This period is a time phase in which atmospheric precipitation fluctuates sharply due to the influence of climate change. In order to assess the effects of climate change in recent periods, comparisons were made with the latest climate norm of the World Meteorological Organization (1981-2010) [23, 24]. In addition, in order to accurately determine the changes in the tendency of atmospheric precipitation in the multi-year period, the long-term (1961-2023) period was also considered as 10-year time phases. Based on the results obtained in the analyses, histograms, graphs and tables were processed in the MS Excel program, and maps were processed in the ArcGIS program. Various parameters of hydrometeorological stations are given in Table 1.

In the graphs constructed to monitor the multi-year dynamics of precipitation, unstable jumps in individual years can be seen. To determine the tendency of these indicators in the general period, a trend curve is used.

However, although the trend line shows the tendency in the general period, the dynamics in small time phases can only be determined by the moving average quantity.

The parameter provides smoothing of the graph of random variables with such jumps, which allows the researcher to determine the direction of the trend of the random variable in separate periods [15, 23]. This quantity is calculated as follows:

Table 1

The main characteristics of the hydrometeorological stations

Station	Height, m	Observation periods, year	Climate norm: Precipitation quantity (1981-2010), mm
Alibey	1786	1961-2020	1326
Saribash	1680	2008-2023	-
Gobustan	775	1961-2023	331
Shamakhi	750	1961-2023	576
Gabala	679	1961-2023	941
Ismayilli	653	1983-2023	639
Sheki	639	1961-2023	786
Oghuz	582	1961-2023	889
Zagatala	487	1961-2023	977

$$X_{li} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 \dots + X_{10}}{10}, X_{2i} \dots$$

where, X_{li} - is the moving quantity of the annual precipitation amount of the random quantity. X_1 , X_2 etc. are the series limits for the year under consideration and the last 10 years in which it is included. The coefficient of the moving quantity in the cell under consideration is equal to the average of the next 10 years in which it is included in that year. The next limit of the moving quantity is again the average of the precipitation in that year and the next 9-year limit. Thus, the series is completed.

The main material. The time-spatial distribution of precipitation in the southern and southeastern parts of the Greater Caucasus province varies depending on the geographical location and relief features of the area. The region has a mountainous relief. Most of the territory is located at an altitude of 1000 m above sea level. The study area covers the southern and southeastern foothills of the Greater Caucasus Range. The region is bounded by the Ganikh-Ayrichay depression in the northwest and south, and by the Kura depression in the southeast. The Greater Caucasus Range begins with the Gubakh range and changes in altitude above sea level in the southeast, ending with the Garabagh, Langebiz ranges, and the Alat ridge. The main elevations in the area are the

peaks of Malkemud (3878 m), Ragdan (4020 m), Tufandagh (4191 m), Bazarduzu (4466 m), etc. [3, 16].

The greatest influence on the distribution of precipitation in the area is exerted by the relief. The main atmospheric precipitation is formed due to air masses coming from the north. The fact that precipitation falls in the warm period of the year creates a great advantage in providing the mountainous region with water resources [1, 2, 10].

According to multi-year (1991-2023) data, the average multi-year amount of precipitation in the southern and southeastern part of the Greater Caucasus province is 816 mm. The amount of precipitation varies between 307-1290 mm at individual stations. The highest average annual precipitation falls in Alibay (1290 mm), the least in Gobustan (307 mm). The amount of precipitation in this part of the Greater Caucasus province decreases from northwest to southeast, from the plain to the high mountains. Thus, the multi-year amount of precipitation is observed at the Zagatala station located in the plain area of 950 mm, at Alibay 1290 mm and in Gobustan in the east 307 mm. Here, the main part of the precipitation falls in spring, summer and autumn, and a smaller part in winter [6, 15]. In general, 56% of the annual precipitation in the region falls during the warm season and 44% during the cold season (Table 2).

Table 2

Temporal distribution of atmospheric precipitation in the south and southeast of the Greater Caucasus province

Station	Year-round, mm					Seasonal, %	
	winter	spring	summer	autumn	year	cold	hot
Alibey	134	397	397	362	1290	38	62
Saribash	133	361	354	259	1108	35	65
Gobustan	62	95	61	88	307	49	51
Shamakhi	111	163	96	169	539	52	48
Gabala	144	297	194	280	915	46	54
Ismayilli	109	199	131	200	639	48	52
Sheki	108	241	202	198	748	41	59
Oghuz	135	278	181	253	847	46	54
Zagatala	117	314	272	247	950	38	62
Region	117	261	210	228	816	44	56

The monthly distribution of atmospheric precipitation in the southern and southeastern part of the Greater Caucasus province for 1991-2023 is given in Table 3. As can be seen from the table, the least rainy period in the region falls on the winter months. Thus, the amount of precipitation is 36 mm in December, 38 mm in January, and 43 mm in February. Starting from March, there is an increase in the amount of precipitation. The amount of precipitation reaches 67 mm in spring, that is, in March, and 81 mm in April. The amount of precipitation reaches its annual maximum in May (112 mm). Starting from June, the process of decreasing precipitation begins with an increase in temperature. In June, this amount decreases to 88 mm, in July to 65 mm, and in August to 57 mm. In autumn, the decrease in temperature activates the activity of convective processes in the region [2]. Thus, the amount of precipitation is 89 mm in September, 82 mm in October, and 58 mm in November. Overall, the average annual precipitation in the region is 816 mm.

The distribution of maximum monthly precipitation values in the southern and southeastern parts of

the Greater Caucasus province is similar to their average monthly values. The maximum value of multi-year precipitation for the region is 2128 mm. If we focus on individual months, the maximum monthly precipitation is 157 mm in January, 172 mm in February, and 183 mm in March. This indicator increases to 257 mm in April, 344 mm in May, and 501 mm in June. The highest maximum monthly precipitation values are observed in June. From mid-summer, certain decreases occur in the maximum monthly precipitation values. This indicator decreases to 291 mm in July and 367 mm in August. Although the maximum monthly precipitation increases in September (408 mm), it decreases to 333 mm in October and 248 mm in November. The maximum monthly precipitation reaches its lowest value in December and amounts to 146 mm. If we look at the data of individual hydrometeorological stations in this area, the most abundant annual precipitation fell in Saribash, amounting to 2128 mm. In the research, the surface distribution of atmospheric precipitation in the south and south-east of the Greater Caucasus province was determined with of GIS technology (Figure 1).

Table 3

Distribution of average monthly (1991-2023) and maximum monthly (1961-2023) precipitation in the south and southeast of the Greater Caucasus province

Station		Months												Σ
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Average	Alibey	46	49	88	135	174	170	113	114	150	128	83	39	1290
	Saribash	48	44	90	108	164	144	117	93	116	93	51	40	1108
	Gobustan	19	24	31	29	36	26	23	12	32	31	25	20	307
	Shamakhi	34	43	44	51	68	44	28	25	57	63	49	34	539
	Gabala	47	56	79	90	129	84	58	52	99	109	73	42	915
	Ismayilli	32	42	52	56	90	62	40	29	73	72	54	34	639
	Sheki	36	40	64	78	99	86	59	57	76	67	55	32	748
	Oghuz	43	50	78	84	116	72	59	49	93	96	64	42	847
	Zagatala	36	43	76	102	137	109	84	80	103	79	64	38	950
Region		38	43	67	81	112	88	65	57	89	82	58	36	816
Maximum	Alibey	126	126	183	237	344	348	291	367	345	329	248	91	1960
	Saribash	120	172	164	170	273	501	286	261	408	167	143	96	2128
	Gobustan	52	75	126	97	171	129	159	53	160	106	93	77	664
	Shamakhi	117	115	131	194	181	135	172	124	229	223	116	91	1099
	Gabala	157	157	178	257	319	242	286	219	265	333	152	111	1514
	Ismayilli	64	91	142	164	233	229	153	137	212	206	145	85	876
	Sheki	101	87	158	195	254	268	145	264	201	212	157	78	1093
	Oghuz	117	103	182	231	318	282	286	219	266	270	129	111	1561
	Zagatala	123	108	171	255	306	264	272	297	268	213	160	146	1409
Region		157	172	183	257	344	501	291	367	408	333	248	146	2128

There is a variation in the vertical zonality distribution of precipitation due to the mountainous terrain of the area. If we pay attention to the map, the amount of precipitation over the area falls more in the moderately mountainous area. In the southeast of the region, towards the border of Gobustan-Absheron,

the amount of precipitation falls less than 600 mm. Here, less precipitation is observed in the plain, frontal mountainous and low mountainous areas in terms of vertical zonality. This amount varies around 600-1000 mm. However, although the indicator is higher than 1400 mm towards the lower parts of the

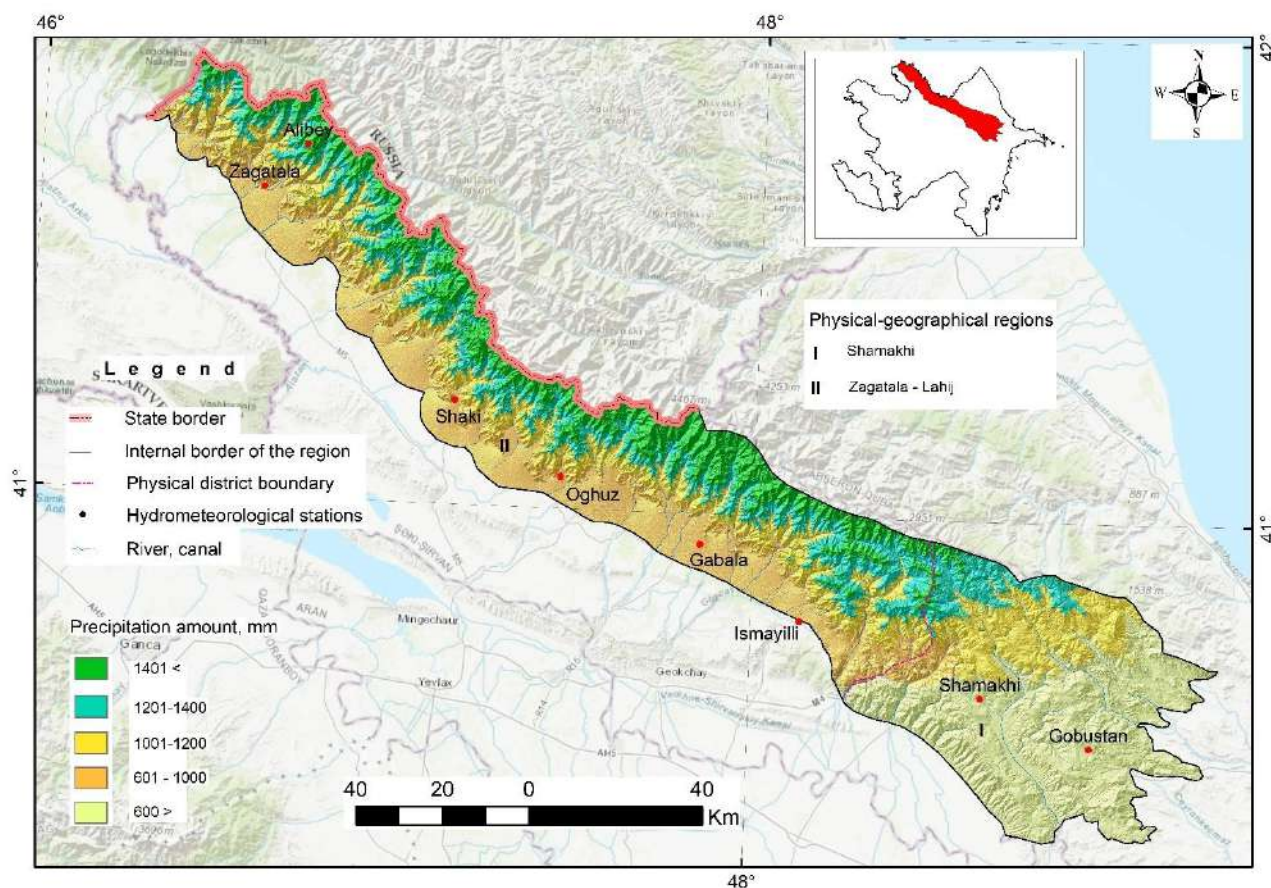


Fig. 1. Average annual precipitation (1991-2023)

high mountainous region, it begins to decrease again at higher altitudes. There are two maxima of precipitation in terms of vertical zonality. However, the lack of visual observation data and the small size of the map do not allow us to express this change. The altitude decreases towards the east of the Greater Caucasus Mountains, and the amount of precipitation continues to decrease as the relief smoothes towards the Absheron Peninsula. The decrease in the average annual amount of precipitation begins from Shamakhi. Because, synoptic processes affecting the Absheron Peninsula have an impact up to this region. Towards the east, the influence of this type of climate conditions increases and the amount of precipitation decreases [3, 16].

The study also paid attention to the changes in the amount of precipitation in the southern slope of the Greater Caucasus Mountains in 2011-2023 compared to 1981-2010. As can be seen from Table 4, the amount of precipitation in the southern and south-eastern part of the Greater Caucasus province increased by 3-29% in January at other stations, except for Shamakhi (4%). In February, this indicator increased by 9-16% in Gobustan and Shamakhi, but decreased by 1-28% in other stations. In March, the amount of precipitation decreased by 5-11% in Gobustan and Shamakhi, and increased by 5-19% in other stations. Although there was a slight (1%) posi-

tive fluctuation in Zagatala in April, the amount of precipitation at other stations decreased by 2-33% compared to the climate norm. Although this indicator decreased by 3% in Shamakhi in May, it increased by around 3-25% at the remaining stations. Compared to the climate norm, the amount of precipitation at all regional stations in 2011-2023 decreased by 5-35% in June, 4-30% in July, and 5-42% in August. Although these indicators increased by around 1-14% in Gobustan, Ismayilli, Shaki, and Zagatala in September, they decreased by 3-12% at other stations. Although precipitation in October decreased by around 4-17% in Shamakhi, Gabala, Shaki, and Oghuz compared to the climate norm, they increased by 3-18% at other stations. Although precipitation in November decreased by 1-30% in Alibay, Shamakhi, Shaki, Oghuz and Zagatala, it increased by 3-34% in other stations of the region. Compared to the norm, the amount of precipitation in 2011-2023 increased by 34% in Gobustan in December, but decreased by 1-26% in all stations. If we pay attention to the table, precipitation fluctuates chaotically in the autumn months. Thus, although this indicator increases in several stations, it decreases in other stations. Such a process reduces the severity of fluctuations in the total precipitation of the region. This is due to the synoptic situation. Because in autumn, air masses coming from the north to the southeast of the region and

Table 4

Average monthly and average annual precipitation anomalies (mm, %-bold)

Station	Months												Year
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Alibey	12	-16	7	-3	8	-9	-39	-58	-16	4	-1	-9	-120
	29	-28	9	-2	5	-5	-30	-42	-11	3	-1	-21	-9
Gobustan	5	4	-4	-9	4	-11	-4	-6	4	6	8	6	4
	25	16	-11	-25	11	-35	-15	-36	14	18	34	34	1
Shamakhi	-1	4	-2	-21	-2	-3	-2	-5	-7	-12	-5	-2	-57
	-4	9	-5	-33	-3	-6	-8	-18	-12	-17	-9	-6	-10
Gabala	2	-3	13	-27	8	-7	-20	-16	-3	-4	2	-0.3	-57
	3	-5	19	-27	6	-9	-28	-25	-3	-4	3	-1	-6
Ismayilli	3	-0.4	6	-22	19	-8	-2	-2	1	3	2	-2	-2
	9	-1	11	-32	25	-13	-4	-5	1	4	3	-5	-0.3
Shaki	7	-7	10	-20	3	-21	-10	-11	8	-12	-14	-2	-69
	23	-15	16	-24	3	-23	-16	-17	13	-15	-23	-6	-9
Oghuz	3	-4	4	-18	8	-21	-12	-7	-7	-8	-5	-1	-69
	7	-8	5	-20	7	-26	-17	-11	-8	-7	-8	-3	-8
Zagatala	8	-10	7	1	6	-20	-10	-19	11	10	-22	-10	-48
	24	-20	9	1	5	-17	-12	-20	12	12	-30	-26	-5
Province	5	-4	5	-15	7	-13	-12	-15	-1	-2	-4	-3	-52
	13	-9	8	-18	7	-15	-19	-25	-1	-2	-7	-7	-6

local air circulation cause a different distribution of precipitation [28].

The average annual precipitation fluctuations in the southern and southeastern parts of the Greater Caucasus province show that although there was a 1% increase in Gobustan, the precipitation of other stations decreased by up to 10% compared to the climatic norm. The maximum decrease in the average annual precipitation compared to the climatic norm occurred in Shamakhi by 10% (57 mm), in Shaki by 9% (69 mm), in Oghuz by 8% (69 mm) and in Alibay by 9% (120 mm). As a result, the average annual precipitation in the study area in 2011-2023 was determined to decrease by 52 mm or 6% compared to the norm (1981-2010). In this region, precipitation levels decreased by 7.7% (67 mm) during the 1991-2023 period (866 mm) compared to the 1961-1990 baseline (799 mm).

The decrease in precipitation in the region leads to a decrease in the freshwater reserves and the water content of the territorial rivers in the area. We know that this mountainous zone plays a major role in providing freshwater to the neighboring plains in the south and the Absheron Peninsula (Oghuz-Gabala-Baku water pipeline). Rapid forest loss is already being observed in the basins of the moderately mountainous parts of the rivers. The decrease in precipitation in the summer months coincides with the vegetation period when plants have the greatest need for water.

A graph of monthly changes in precipitation in 2011-2023 compared to 1981-2010 has been compiled for the southern and southeastern parts of the Greater Caucasus province (Figure 2). As can be seen

from the graph, the largest decrease, 15 mm, falls on April (18%) and August (25%). The decrease in precipitation in February is 4 mm (9%), in summer it is 12-15 mm (15-25%), in autumn it is 1-4 mm (1-7%). The recent increase in precipitation was 5 mm (13%) in January, 5 mm (8%) in March, 7 mm (7%) in May. In September, the fluctuation indicators are very weak.

In order to monitor the long-term dynamics of the annual amount of atmospheric precipitation in the southern and southeastern part of the Greater Caucasus province, a graph has been drawn up. On the other hand, the trend line, the moving average value has also been added to the graph.

When examining the moving average, it can be observed that precipitation was higher compared to the climatic norm during the periods 1971-1990 and in the year 2010. However, during the periods 1991-2008 and 2011-2023, the amount of precipitation in this region was lower than the norm (1981-2010). The most significant decreasing trend over the long term occurred during the years 2018-2021 (Figure 3). During the period 1961-2023, the years 1961, 1971, 1985, 1995, 1996, 2001, 2013, 2014, 2017 and 2019 were the 10 years with the least precipitation, and the years 1963, 1972, 1981-1983, 1994, 1997, 2003, 2016 and 2018 were the 10 years with the most precipitation. 70% of the years with abundant precipitation in the study area were observed in the period before 1997. 70% of the years with less precipitation were observed in 1985 and after. These facts ground that precipitation in the region has been rapidly decreasing in recent times. The decrease in precipitation occurs due to increasing in regional temperature.

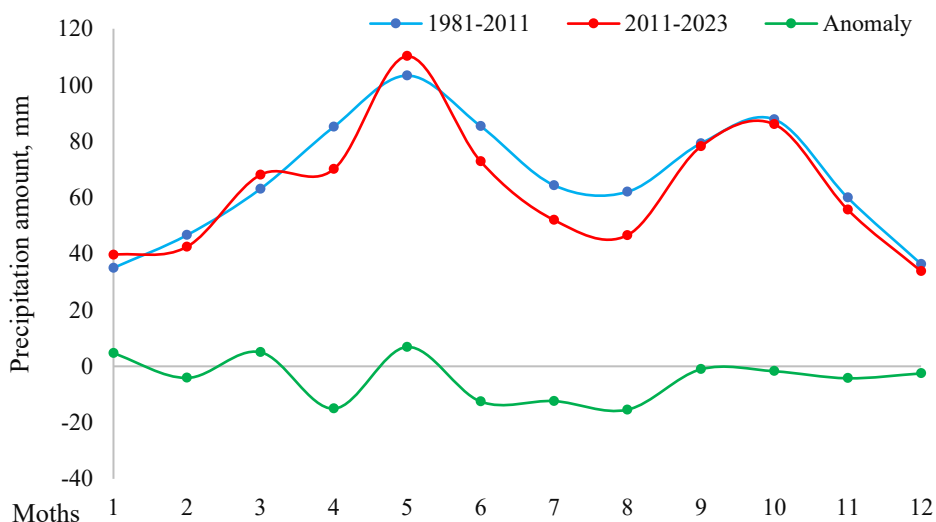


Fig. 2. Fluctuations in monthly precipitation amounts in the southern and southeastern parts of the Greater Caucasus region

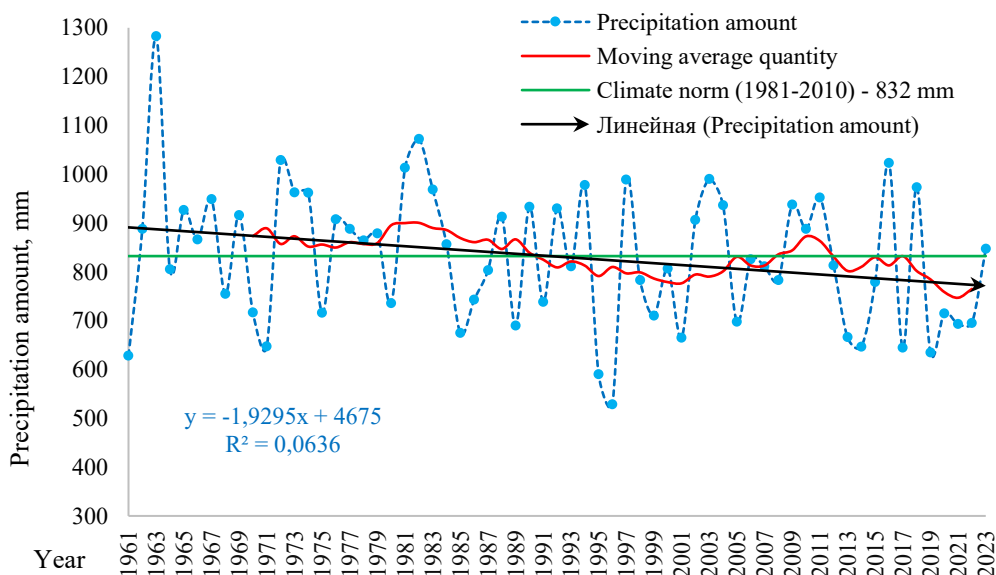


Fig. 3. Multiannual dynamics of precipitation in the southern and southeastern of the Greater Caucasus province

In order to determine the multi-year dynamics of precipitation in the southern and southeastern part of the Greater Caucasus province, a difference integral curve was constructed based on the data of hydrometeorological stations (Figure 4). From figure 4, it is obvious that the tendency for the Oghuz, Zagatala, Gabala, Shaki and Ismaili stations in the period from 1961 to 2023 are approximately the same. Thus, the amount of precipitation increased at the listed 5 stations from 1961 to 1983 (in Sheki from 1984), gradually decreased from 1984 to 1994, and sharply decreased from 1995 to 2023, excluding occasional deviations. The dynamics of the difference integral of atmospheric precipitation at the Alibay station is similar to the multi-year changes of other stations. Only, although there was a significant increase in the

amount of precipitation here in 2001-2012, the decrease from 2013 continues until the end of the period. At the Gobustan and Shamakhi stations, which differ from other stations, there was an increase in the amount of precipitation from 1961 to 1990. Although there was no noticeable change at these stations for several years, from 1994, precipitation at the Gobustan station decreased towards 2023. However, the decrease in the amount of precipitation in Shamakhi continued until 2008, there was a short-term increase between 2009-2013, and then decreased until the end of the period. The existence of such differences at the Gobustan and Shamakhi stations can be explained by the different physical and geographical position of these areas compared to other stations, and variable synoptic and albedo conditions.

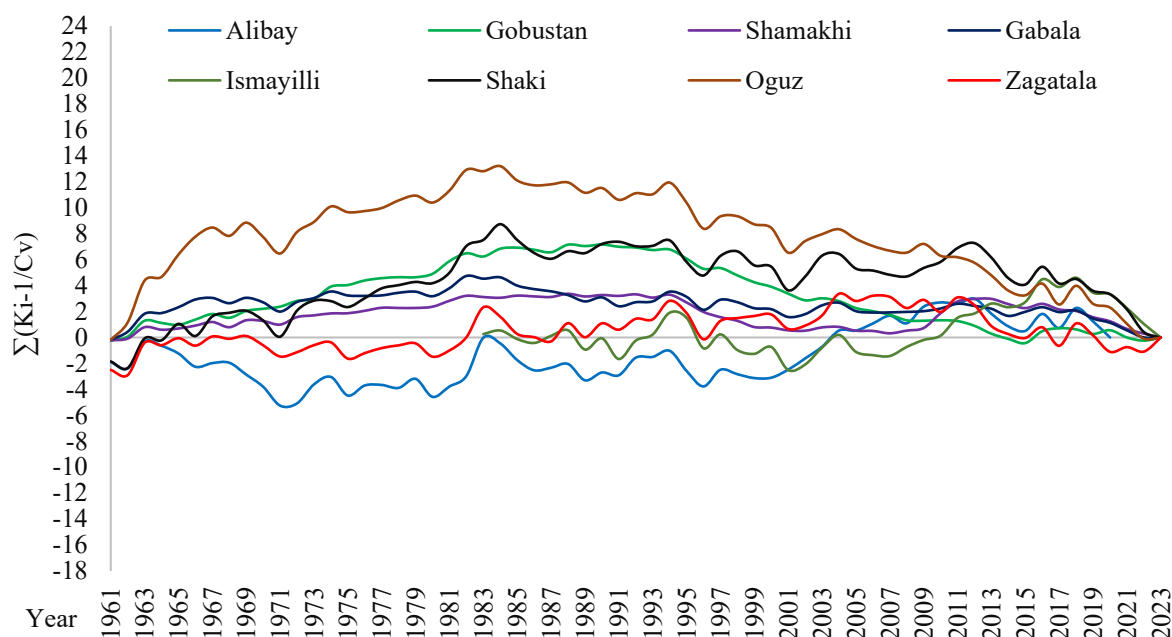


Fig. 4. Difference integral curve of precipitation in 1961-2023

Various climate models predict an increase in maximum precipitation expected towards the end of this century due to climate change. Currently, determining the impact of climate change on the maximum precipitation that occurs annually in individual regions is of particular importance for the early prediction of hazardous natural phenomena [5, 19].

The absolute maximum values of precipitation in the southern and southeastern parts of the Greater Caucasus province for the period 1961-2020 have been determined (Figure 5). From figure it is obvious that the multi-year maximum precipitation in the

region fell by 107 mm in 1997. There are sharp fluctuations in precipitation at certain time phases in the long-term period. Thus, it is noteworthy that maximum precipitation occurs more frequently in 1962-1967, 1992-1997, 2004-2007, 2013-2015, 2019 and 2020. The trend line shows that the maximum annual precipitation in this area has increased. Given that the maximum amount falls more often in torrential rains, it follows that there has also been an increase in the frequency of this type of precipitation in recent times. The moving average graph shows a decrease in precipitation in 1961-1968 and 1992-1999.

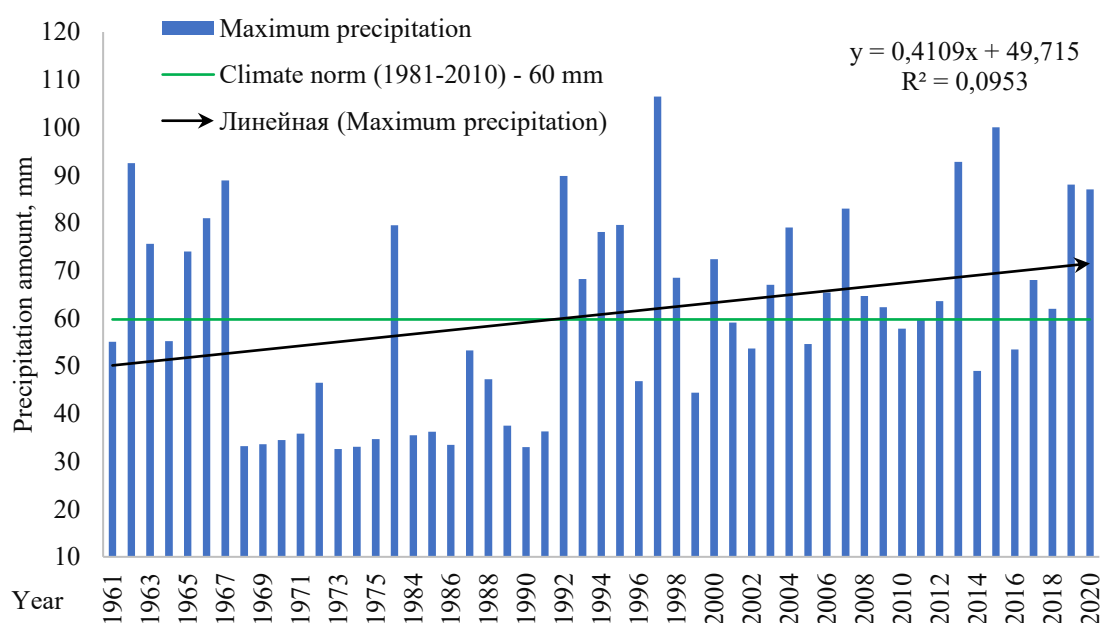


Fig. 5. Annual absolute maximum precipitation in the southern and southeastern of the Greater Caucasus province

However, it has a positive indicators in 1969-1992 and 2000-2020. If we pay attention to the graph, although the maximum precipitation was subject to sharp changes until 1992, there are more chaotic changes in 1993-2020. This is also due to a similar feature of modern warming.

The average 10-year indicators of the amount of multi-year maximum precipitation were compared with the climate norm (1981-2010). Compared with the norm, the absolute maximum precipitation amount fell more than the norm in 1961-1970 (4%), 1991-2000 (9%), 2001-2010 (8%) and 2011-2020 (21%). Maximum precipitation fell less than the

climate norm in 1971-1980 (27%) and 1981-1990 (34%). In 1971-1990, annual maximum precipitation was less recurred than in other periods. This is one of the dangerous effects of climate change. Thus, in addition to the decrease in the amount of precipitation in the considered area, its annual distribution period is shortened.

The overall annual recurrence of precipitation amounts is shown in the histogram below (Figure 6). We can also see from the histogram that the lowest recurrence limits of precipitation are 6% for the region and are observed in the ranges of 61-70 mm, 71-80 mm and 101-120 mm.

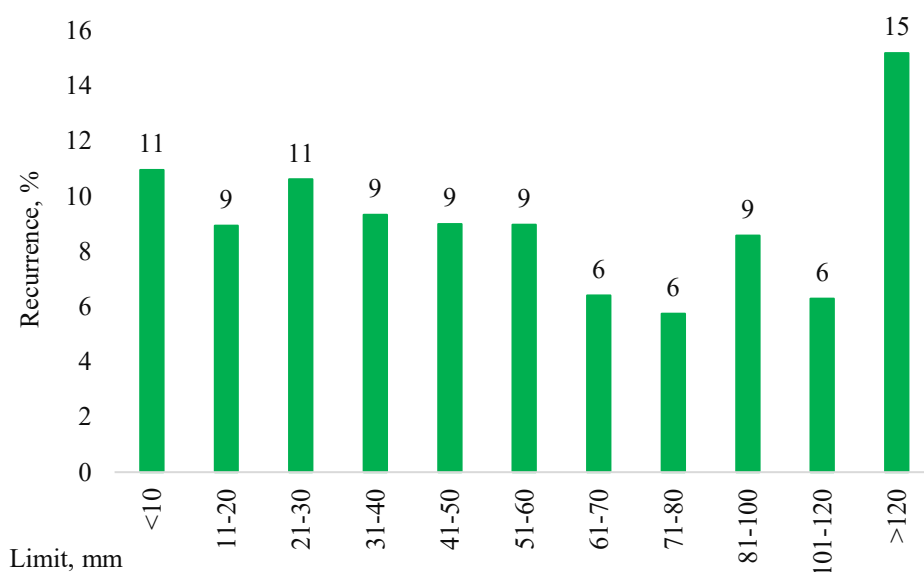


Fig. 6. Recurrence of various annual precipitation limits in the southern and southeastern of the Greater Caucasus province (%)

The average decade precipitation indicators for continuous stations in the southern and southeastern part of the Greater Caucasus province (Alibey, Gobustan, Shamakhi, Gabala, Sheki, Oghuz, Zagatala) were compared with the corresponding indicators of the previous decade (Figure 7). Thus, although the amount of precipitation in the region was 873 mm in 1961-1970, it decreased by 1.6% in 1971-1980 compared to the previous decade, increased by 0.9% in 1981-1990, and decreased by 9.3% in 1991-2000. The amount of precipitation in the region in 2001-2010 was 7.3% more than the previous 10 years. However, the amount of precipitation here in 2011-2020 decreased by 7.0%.

Conclusions. The following results were obtained from the analysis conducted on the basis of preliminary data on atmospheric precipitation in the southern and southeastern of the Greater Caucasus province for 1961-2023:

1. The average annual value of atmospheric precipitation in the southern and southeastern of the Greater Caucasus province for 1991-2023 was 816 mm. 56% of the annual precipitation in the region fell

in the warm season, and 44% in the cold season.

2. In this part of the region, the mean annual precipitation decreased by 6% (52 mm) during the 2011-2023 period compared to the 1981-2010 reference interval. The greatest decrease by months occurred in April and August, amounting to 15 mm.

3. While the region's maximum precipitation exhibited sharp interannual fluctuations up to 1992, the period from 1993 to 2020 was characterized by increased chaotic variability. This trend aligns with the analogous features observed in contemporary warming patterns.

4. The region is dominated by the recurrence of heavy precipitation, exceeding 120 mm, with an annual recurrence rate of about 15%. The most frequent occurrences of II and III in the region are less than 10 mm and 21-30 mm, which accounts for 11% of the region's occurrence.

The southern and southeastern parts of the Greater Caucasus province are the areas where the country's main river systems are formed. These rivers meet the agricultural and drinking water needs of not only this area, but also neighboring regions. The de-

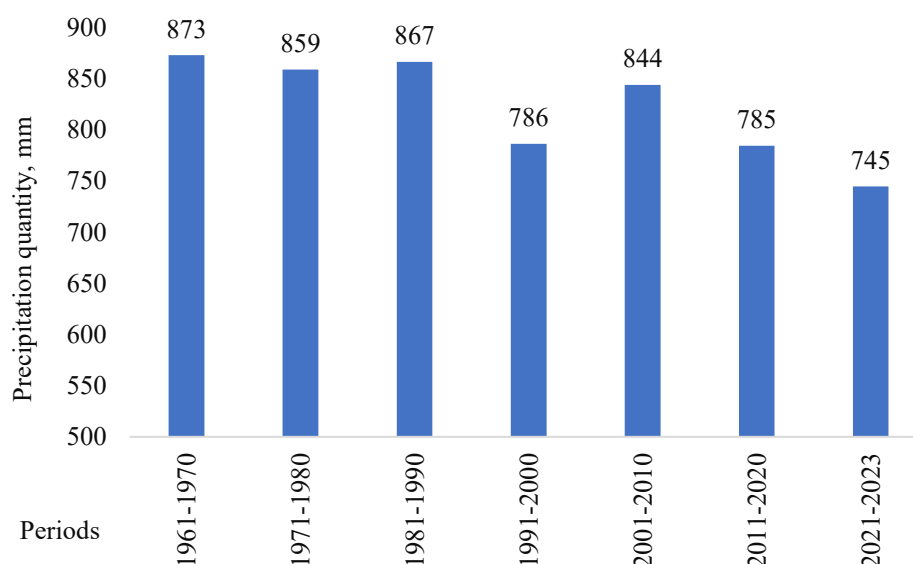


Fig. 7. Dynamics of precipitation over decades in the southern and southeastern of the Greater Caucasus province

crease in precipitation due to climate change leads to a decrease in the water content of rivers. If this process continues, serious difficulties may arise. It is true that this area receives sufficient precipitation throughout the year (with the exception of Gobustan and Shamakhi), but the decrease in precipitation in the summer months, especially when plants enter the vegetation period, reduces productivity. Therefore, it is important to carry out proper irrigation measures.

It is necessary to build reservoirs to meet the water needs of the economy and people (especially neighboring areas). In addition, in order to prevent water loss, the channels and surfaces of the canals should be closed with a special cover. In agriculture, it is important to plant drought-resistant plants and also to conduct irrigation using new modern intensive methods (drip, spraying) rather than traditional ones.

Bibliography

1. Abbasov, R., Karimov, R. Jafarova, N. (2022). *Mountain ecosystem values. Ecosystem Services in Azerbaijan: Value and Losses*, 1, 29-69.
2. Климат Азербайджана. под ред. Э.М. Шихлинского. (1968). аку: Издательство Академии наук Азербайджанской ССР, 360.
3. *Azərbaycan Respublikasının Coğrafiyası. Red. R.M. Məmmədov. (2015). Bakı: Avropa, 1: Fiziki Coğrafiya. 530.*
4. Hüseynov, N.Ş. (2011). *Sinoptik meteorologiya. Bakı: Səda, 316.*
5. 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. doi: <https://doi.org/10.15421/112444>
6. Huseynov, N.Sh. (2024). Climate change: cause, conclusion and perspectives. *Science without borders*, 7, 132-142.
7. Hüseynov, N.Ş., Hüseynov, C.S. (2024). *Azərbaycanın iqlimi: Havanın temperatur rejimi. Bakı: Optimist, 267.*
8. 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>
9. İsmayilov, R.A. (2021). *Azərbaycan çaylarının ekoloji təhlükəsizliyinin qiymətləndirilməsi. "Sukanal" Elmi-Tədqiqat və Layihə İnstitutu, Bakı, 272.*
10. İsmayilov, R., Suleymanov, F. (2024). Water resilience under climate change in Azerbaijan. *Geojournal of Tourism and Geosites*, 53 (2), 677-686. doi: <https://doi.org/10.30892/gtg.53231-1243>
11. Kenneth, E.K., Thomas, R. K., David, R. E., Kelly, R., John, Y., Xungang, Y., Paula, H. (2013). Probable maximum precipitation and climate change. *Advancing Earth and Space Science: Geophysical Research Letters*. 40 (7), 1257-1455. <https://doi.org/10.1002/grl.50334>
12. 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>
13. Mahmudov, R.N. (2022). *Azərbaycanda regional iqlim dəyişmələri və təhlükəli hidrometeoroloji hadisələr. Bakı: Milli Aviasiya Akademiyası, 210.*
14. *Azərbaycan Respublikası ərazisində hidrometeoroloji şərait və təhlükəli hidrometeoroloji hadisələr (2001-2017-ci illər üzrə dövrü nəşrlər). Azərbaycan Respublikası Ekologiya və Təbii Sərvətlər Nazirliyi, Hidrometeorologiya Elmi-Tədqiqat İnstitutu. Bakı: Ziya, 56.*
15. 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>

16. Azərbaycan Respublikasının Milli Atlası (2014). Red. R.N. Məmmədov. Bakı: Dövlət Torpaq və Xəritəçəkmə Komitəsi, 444.
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. 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. *The Fifth Eurasian Conference dedicated to the 100 th anniversary of Heydar Aliyev, Reliability: Theory & Applications*, 5 (75), 404-410. <https://doi.org/10.24412/1932-2321-2023-575-404-410>
19. Safarov, S.G., Huseynov, D.S., Kuliev, Z.G. (2022). Spatial and temporal features of precipitation distribution in the territory of Azerbaijan. *Hydrometeorological Research and Forecasting*, 1 (383), 77-94. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-1-77-94>.
20. Shcheklov, O., Shpyg, V., Povshyk, T., Fomichev, N. (2024). Influence of atmospheric rivers on extreme precipitation in western Ukraine. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*, (60), 292-304. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-21>
21. Stephens, E., Day, J. J., Pappenberger, F., Cloke, H. (2015). Precipitation and floodiness. *Advancing Earth and Space Science: Geophysical Research Letters*. 42 (23), 316-323. <https://doi.org/10.1002/2015GL066779>.
22. Trenberth, K.E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate research*. 47, 123-138. doi: <https://doi.org/10.3354/cr00953>
23. Volford, A., Ferenc, I., Matyas, R., Istvan, L. (2007). Pattern formation and self-organization in a simple precipitation system. *American Chemical Society: Langmuir*, 23 (3), 961-964. <https://doi.org/10.1021/la0623432>
24. WMO. (2017). *Guidelines on the Calculation of Climate*. 1203, 29. Geneva, Switzerland.
25. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) is the United Nations. Available at: www.ipcc.ch
26. The State Statistical Committee of the Republic of Azerbaijan. Available at: www.stat.gov.az
27. Ministry of Ecology and Natural Resources of the Republic of Azerbaijan. Available at: www.eco.gov.az
28. UN Sustainable Development Goals (UNSDG). Available at: <https://sdgs.un.org/goals>

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

References

1. Abbasov, R., Karimov, R. Jafarova, N. (2022). Mountain ecosystem values. *Ecosystem Services in Azerbaijan: Value and Losses*, 1, 29-69.
2. *Climate of Azerbaijan*. Ed. by E.M. Shikhlin. (1968). Bakı: Publishing House of the Academy of Sciences of the Azerbaijan SSR, 360.
3. *Geography of the Republic of Azerbaijan*. Ed. R.M. Mammadov. (2015). Bakı: Europe, 1: Physical Geography. 530. [in Azerbaijani]
4. Huseynov, N.Sh. (2011). *Synoptic meteorology*. Bakı: Sada, 316. [in Azerbaijani]
5. 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. doi: <https://doi.org/10.15421/112444>
6. Huseynov, N.Sh. (2024). Climate change: cause, conclusion and perspectives. *Science without borders*, 7, 132-142.
7. Huseynov, N.Sh., Huseynov, C.S. (2024). *Climate of Azerbaijan: Temperature regime of the air*. Bakı: Optimist, 267. [in Azerbaijani]
8. 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>
9. Ismayilov, R.A. (2021). Assessment of the ecological safety of Azerbaijani rivers. "Sukanal" Scientific Research and Design Institute, Bakı, 272. [in Azerbaijani]
10. Ismayilov, R., Suleymanov, F. (2024). Water resilience under climate change in Azerbaijan. *Geojournal of Tourism and Geosites*, 53 (2), 677-686. doi: <https://doi.org/10.30892/gtg.53231-1243>
11. Kenneth, E.K., Thomas, R. K., David, R. E., Kelly, R., John, Y., Xungang, Y., Paula, H. (2013). Probable maximum precipitation and climate change. *Advancing Earth and Space Science: Geophysical Research Letters*. 40 (7), 1257-1455. <https://doi.org/10.1002/grl.50334>
12. 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>
13. Mahmudov, R.N. (2022). Regional climate changes and dangerous hydrometeorological phenomena in Azerbaijan. Bakı: National Aviation Academy, 210. [in Azerbaijani]
14. Ministry of Ecology and Natural Resources of the Republic of Azerbaijan. Hydrometeorology Research Institute (Periodical publications for 2001-2017). *Hydrometeorological conditions and dangerous hydrometeorological events in the territory of the Republic of Azerbaijan*. Bakı: Ziya, 56. [in Azerbaijani]
15. 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>
16. *National Atlas of the Republic of Azerbaijan*. (2014). Ed. by M.N. Mammadov. Bakı: State Land and Cartography Committee, 444. [in Azerbaijani]

17. Polishchuk, L. B., Reshetchenko, S. I., Cherkashyna, N. I. (2019). Identification of climate changes based on anthropogenic 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. 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. *The Fifth Eurasian Conference dedicated to the 100 th anniversary of Heydar Aliyev, Reliability: Theory & Applications*, 5 (75), 404-410. <https://doi.org/10.24412/1932-2321-2023-575-404-410>
19. Safarov, S.G., Huseynov, D.S., Kuliev, Z.G. (2022). Spatial and temporal features of precipitation distribution in the territory of Azerbaijan. *Hydrometeorological Research and Forecasting*, 1 (383), 77-94. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-1-77-94>.
20. Shcheglov, O., Shpyg, V., Povshyk, T., Fomichev, N. (2024). Influence of atmospheric rivers on extreme precipitation in western Ukraine. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*, (60), 292-304. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-21>
21. Stephens, E., Day, J. J., Pappenberger, F., Cloke, H. (2015). Precipitation and floodiness. *Advancing Earth and Space Science: Geophysical Research Letters*. 42 (23), 316-323. <https://doi.org/10.1002/2015GL066779>.
22. Trenberth, K.E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate research*. 47, 123-138. doi: <https://doi.org/10.3354/cr00953>
23. Volford, A., Ferenc, I., Matyas, R., Istvan, L. (2007). Pattern formation and self-organization in a simple precipitation system. *American Chemical Society: Langmuir*, 23 (3), 961-964. <https://doi.org/10.1021/la0623432>
24. WMO. (2017). *Guidelines on the Calculation of Climate*. 1203, 29. Geneva, Switzerland.
25. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) is the United Nations. Available at: www.ipcc.ch
26. The State Statistical Committee of the Republic of Azerbaijan. Available at: www.stat.gov.az
27. Ministry of Ecology and Natural Resources of the Republic of Azerbaijan. Available at: www.eco.gov.az
28. UN Sustainable Development Goals (UNSDG). Available at: <https://sdgs.un.org/goals>

Характеристика сучасного просторово-часового розподілу атмосферних опадів у південній та південно-східній частинах регіону Великого Кавказу

Джамал Гусейнов ¹

д. філософії (географія),

¹ Національна авіаційна академія, АТ «Азербайджанські авіалінії», Баку, Азербайджан;

Аллахверді Тагієв ²

аспірант, наук. співробітник,

² Азербайджанський державний університет нафти та промисловості,
Міністерство науки та освіти Азербайджанської Республіки, Баку, Азербайджан;

Мехрібан Ісмаїлова ²

д. філософії (Науки про Землю)

Наразі глобальне потепління, що спостерігається на Землі, проявляє свої наслідки на Південному Кавказі, як і в усіх інших регіонах. Зі зростанням температури повітря низка кліматичних елементів змінює свої довгострокові закономірності. Проаналізовано сучасні просторово-часові зміни атмосферних опадів у південній та південно-східній частинах регіону Великого Кавказу. Дослідження проводилося з метою визначення впливу зміни клімату на просторово-часовий розподіл атмосферних опадів у південній та південно-східній частинах регіону Великого Кавказу. В аналізі використовувалися дані спостережень за атмосферними опадами, зібрані з гідрометеорологічних станцій Закатала, Огуз, Шеки, Ісмаїлли, Шамахи, Габала, Гобустан, Сарібаш та Алібай за період з 1961 по 2023 рік. Дослідження проводилося з використанням сучасних математико-статистичних, фізичних, картографічних методів та ГІС-технологій. У дослідженні розглянуто екстремальні випадки атмосферних опадів з 1961 по 2023 рік, а також сучасні просторово-часові характеристики розподілу (місячні, сезонні, річні та поверхневі) за період з 1991 по 2023 рік. Під час аналізу було визначено, що середня багаторічна кількість атмосферних опадів у південній та південно-східній частині регіону Великого Кавказу становить 816 мм. Із загальної річної кількості опадів у регіоні 56% припадає на теплий період, а 44% – на холодний. Загалом у цій частині регіону кількість опадів зменшується від більших висот до низин та з північного заходу на південний схід. У досліджуваній зоні зменшення кількості опадів спостерігається в усі місяці, крім січня, березня та травня. Зменшення кількості опадів у весняні та літні місяці особливо негативно впливає на розвиток сільськогосподарських культур, оскільки збігається з їх вегетаційним періодом. Опади в регіоні переважно мають повторюваність 120 мм і вище. Результати дослідження можуть бути використані для створення нових сільськогосподарських угідь, складання карт, економічних оцінок та розробки заходів щодо пом'якшення наслідків зміни клімату.

Ключові слова: зміна клімату, атмосферні опади, ГІС-технологія, межа повторюваності опадів, різнице-вий інтеграл, ковзна середня величина, аномалія опадів.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 18 лютого 2025 р.

Прийнята 9 квітня 2025 р.

Ethno-demographic aspects of population aging in Azerbaijan (in a case study for the Shaki-Zagatala economic region)

Bayimkhanim Huseynova

PhD Student, Researcher,

Institute of Geography named after Academician Hasan Aliyev, Baku, Azerbaijan,

e-mail: nane_huseinova@yahoo.com,  <https://orcid.org/0000-0003-0975-0302>

ABSTRACT

Problem statement. The ethnodemographic aspects of population aging in the Shaki-Zagatala economic region, which is located in the northwestern part of Azerbaijan and has a rich ethnic composition, were scrutinized in the research paper. The analysis of this issue is important in terms of regulating demographic development, protecting ethnic minorities, and controlling population employment, taking into account the current and future dynamics of the population, as well as ethnic minorities.

Purpose. The primary purpose of the research is to unravel the dynamics of the age composition among various ethnic groups in the more recent decades, study the level of population aging and the impact of other demographic indicators on it, calculate the aging index, and provide a forecast taking into account the recent and current situation.

Research methods. During the research procedure, literary and archive materials were examined, statistical materials were obtained, structural-functional analysis, generalization, and historical and geographic modelling methods were applied. Moreover, field research works were conducted to examine the region closely and to study aging as well.

Research results. As a result of the conducted research, it was posed that from 1999-2019, the share of those aged 65 and over increased among minority ethnic groups, Azerbaijanis, and the country's total population. The leading causes behind this change in each ethnic group was the decrease in the number of people aged 0-4 and 5-9, in other words, the decrease in the birth rate in the last decade led to an increase in the share of the elderly due to the decrease in the number of people in the lower age group among the total population. At the same time, traces of the high natural increase that existed before the Second World War, that is, from 1935 to 1939, can be experienced as well. The high natural increase recorded in those years affected a slight increase in the share of the elderly in 2009. At the same time, the participation of the marriageable age population in migration processes also played a significant role in the decrease in the share of people in the lower age group.

Conclusion. It can be concluded that the level of aging has increased in the region for both Azerbaijanis and ethnic minorities, and among the factors affecting this process, a decrease in birth rates and an increase in average life expectancy have played a significant role. Moreover, the Aging Index (AI) indicators also moved along an increasing trend from 1999-2019. In the model prepared based on changes in age groups, the population, as well as ethnic minorities, moved from the second phase of the demographic transition to the third phase from 1999-2019, and are currently approaching phase IV. Similarly, both the Aging Index and the Active Aging Index are expected to increase in the coming decades. According to the forecast, by 2059, due to the high natural increase recorded in previous years, the share of the elderly among the total population and ethnic minorities will have increased significantly. This will have culminated in a regressive demographic situation in the country.

Keywords: Azerbaijan, Shaki-Zagatala, ethnic minorities, population aging, Aging Index, Active Aging Index, projection.

In cites: Huseynova Bayimkhanim (2025). Ethno-demographic aspects of population aging in Azerbaijan (in a case study for the Shaki-Zagatala economic region). *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (62), 372-383. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-28>

Introduction and research status. Throughout the history of humankind, the world's population has constantly altered under the influence of natural, socio-economic, and demographic factors. Turning back to the previous years, because of the relatively high natality and mortality, the share of younger ones was always relatively higher compared to the middle-aged and older ones. As of the current millennium (this time is considered for developing countries like Azerbaijan, but it started for the developed countries after the industrial revolution), this figure for the birth rate has commenced experiencing a downturn trend whilst the death rate has proceeded to the reverse direction. In recent years, for some regions, especially in Eastern Europe, Caucasus Countries, Middle Asia, ASEAN countries, etc., this trend has intensified with decreasing mortality, fertility, and population growth rates [3; 4; 14; 18; 28; 33]. As a result of

the aforementioned downward trend, the ratio structure of 3 major age groups (younger, middle, and older) has been disproportionate, that is, although the share of the younger generation has seen a decline, these shares for middle-aged and older ones have multiplied [2; 9].

According to UN estimates, the share of older people (those aged 60 and over) will probably increase from 10,3% (2024) to 16,4% in 2030 and to 21,3% in 2050, while this figure was 5,5% in 1974 [21]. Based on the UN World Population Aging Report (2023) and some research papers, population aging is accepted as a normal process in today's world [20]. It is fairly logical to support this inevitable fact owing to some major realities, such as the improvement and changing of living quality of the population, the technological advances in the healthcare sector, the cumulative increasing role of women in the

community, etc. Nonetheless, we must acknowledge that, no matter how satisfying this change may appear, its consequences can be just as miserable. The acceleration of this process could have a serious impact on the social, economic, and demographic indicators of countries in the coming years.

In the middle of the 20th century, the phenomenon of “population aging” emerged in literary sources in Developed Countries because of diminishing natality. Although the share of the elderly population is higher in Developed Countries, the aging process is proceeding more rapidly in Developing Countries of the world [22]. This is because this process started earlier in the developed countries and the trend weakened relatively over time, the fact that it started recently in the developing countries has caused this trend to accelerate jumping from 8,5% (2000) to 14,9% in 2024 in Azerbaijan, from 15,4% to 16,2% in Georgia, from 6,7% to 10,6% in Türkiye, etc.

Population aging refers to the decrease in the proportion of people in younger age groups in the total population due to the declining natality and the increase in the proportion of older people due to the increase in average life expectancy. More precisely, compared to previous years, demographic processes such as the increase in marriageable age and the decrease in the number of marriages owing to the increase in the role of women in society and the further civilization of people, the preference for fewer children in the family, the increase in divorces, the increase in the average life expectancy due to achievements in the field of medicine, and other socio-demographic determinants have accelerated the aging of the population.

To study the change in the share of the elderly in the total population, the Aging Index is applied, and it refers to the number or share of people aged 65 and over per 100 people under the age of 14 in a given population group. The Aging Index formula is as follows [13]:

$$A_i = \frac{P_{65}}{P_{14}} \times 100$$

There A_i – Aging Index;

P_{65} – the share of people 65 and over;

P_{14} – the share of people 14 and under.

Demographic aging of the population is an inevitable result of the demographic transition [23]. It occurs as a result of changes in long-term demographic indicators in society, namely birth, death, and migration indicators [27]. That is, over time, the downturn of the growth rate of fertility and mortality results in the replacement of demographic phases. The characteristics of the initial stage of the demographic phase are both high mortality and high natality, as well as low population increase. This phase witnessed (in the various periods for various regions) the bygone

millennia across the globe. The second stage of the phase is more characteristics for the least developed countries and distinguish with high natality, moderate mortality, and moderate population increase. Notably, the least developed countries, nowadays, have jumped to the third state with relatively low mortality, moderate population growth, and natality. Nonetheless, at this moment, in most world countries, the third phase of the demographic transition disappears and the transition to the fourth phase, and in some countries, the fifth phase, emerges.

In the Republic of Azerbaijan, the regressive demographic trend in marriage, natural increase, and progressive trend in divorces in recent years has led to a slight increase in the share of middle-aged and elderly people among the population. At the same time, the increase in average life expectancy at birth from 74.8 to 78.4 from the 1990s to 2023 has somewhat accelerated this process [32].

The ethno-demographic aspect of population aging refers to the increase in the total share of elderly people among ethnic and national minorities. Speaking candidly, the aging process has almost the same trajectory in all the regions of Azerbaijan; however, this situation for some ethnic minorities has relatively been fast-paced. Since the aging process of minority ethnic groups directly affects their dynamics and other demographic indicators, studying this process is considered a very important issue in terms of protecting the country's ethnic diversity, including minority ethnic groups, studying the impact of population aging on ethnodemographic indicators, studying the trends in their dynamics and future situation, and studying the processes of regulating and controlling demographic development, organizing and regulating the ethno-settlement system.

In the world countries and Azerbaijan, numerous scientific works and research have been conducted on studying the population from an ethnodemographic perspective by A. Knežević, N. Trnavčević, D. Bakić (2019), A. Maulen, R. Kadyrzhanov, S. Mussatayev (2024), Sh. Muradov (2021), Z. Eminov (2025), etc. However, research conducted in different countries of the world has either thoroughly analyzed the population of the country where the research was conducted, or covered the dynamics, history, ethnic characteristics, and other general issues of the minority groups living in the country where the research was conducted, or in nearby or other regions. In ethno-demographic research studies conducted in Azerbaijan, the dynamics, historical settlement, and similar issues of minority ethnic groups have been analyzed in depth. In our research, the ethnodemographic aspects of population aging have been analyzed for the first time in the Shaki-Zagatala economic region.

The **essential purpose** of the study is to identify socio-demographic factors that affect and are affect-

ted by the aging process of the population among minority ethnic groups, calculate the Aging Index, and provide a forecast based on age composition.

To achieve the designated purpose, the **following tasks** were appointed:

- Analysis of demographic factors that affect population aging, as well as ethnic minorities, in the region over the past 2 decades;

- Calculation of the Aging Index, analysis of the Active Aging Index;

- Providing a forecast of how the situation will change in the coming decades based on the given trends.

Material and methods. The theoretical analyses conducted in the research work are important in terms of studying the aging dynamics occurring in the demographic and ethnodemographic situation in Azerbaijan, identifying the factors affecting the dynamics of this situation, and comparing the analyses obtained with countries around the world. In the theoretical part of the research, data were collected and analyzed based on international and intranational literature. Generally, issues related to population aging and its ethnodemographic aspect were closely familiarized. For this purpose, to get acquainted with the work carried out in this field in the world, the research works of Zaidi A. (2013, 2016, 2018), Fernandes F., Turra C.M., Rios-Neto E.L. (2023), Lee R. (2003), Dyson T. (2010), Turkulov V, Nadežda M-S, Čedomir G. (2007), Knezević A. (2019), Gnjatović J. (2016), Niemets, L., Segida, K., Guseva, N. (2015), Dörflinger M., Potančoková M., Marois G. (2024), Nguyen T., Nguyen D., Pham L. (2024) and others were analyzed. In Azerbaijan, the research works of Javadov G. (2000), Muradov Sh. (2021), Eminov Z. (2005), Huseynova B. (2021, 2022, 2023, 2024), and others on the study of the general historical and geographical characteristics of ethnic groups were used as sources of information. Additionally, data from the UN Population Fund and reports on the population aging and Active Aging Index in world practice were also utilized as main sources of information.

The statistical data for the research work were collected using census materials and other statistical resources of the State Statistical Committee of the Republic of Azerbaijan (<https://www.stat.gov.az/source/demography/>).

For the preparation of the pragmatic research part of the work, the data recorded in the socio-demographic questionnaires conducted in the area were summarized and comparative-statistical analyses were conducted on its basis with statistical indicators. The questionnaires included questions reflecting ethnodemographic indicators that affect the aging process of the population and, at the same time, the questionnaires also included questions related to the national-ethnic composition of the population and

factors that may affect its change. The survey was conducted in areas densely populated by ethnic groups of the region. About 400 questionnaires were distributed in areas densely populated by ethnic groups and all questionnaires were answered.

During the research procedure, historical methods were applied to analyze data related to the settlement of the territory and the study of demographic indicators from a historical-geographical aspect, mathematical-statistical methods were utilized to collect and analyze statistical materials, cartographic methods were used to visualize data and prepare maps using GIS tools, field research, and socio-demographic surveys were used to closely familiarize with the current ethnodemographic situation in the area and demographic research and modeling methods were used to analyze demographic research and develop a model.

Research area. The total area of the Shaki-Zagatala economic region is 8.84 km², and the population is 626.6 thousand people. The economic region includes 6 cities, 7 small towns, and 336 rural settlements [26]. 16.9% of the population of the economic region, where more than 10 ethnic minorities and national minorities populate, is composed of ethnic and national minorities (2019) [31].

In the region, Avars settle in the Balakan district, Tsakhurs in the Gakh and Zagatala districts, Inghilois and Georgians in the Gakh and Balakan districts, Udis in the Gabala district, and Lezgins in the Shaki, Oghuz and Gabala districts. Among the total population of the economic region, Avars, Lezgins, Tsakhurs, Udis, Inghilois, and Georgians preponderate (Figure 1) [7]. Turning to the share of minority ethnic groups in the economic region, the share of Avars is comparatively higher than other minorities (7.9%). The share of Lezgins was 4.0%, which is half the share of Avars. The share of Tsakhurs was also almost half the share of Lezgins (2.2%). For Inghilois and Georgians, these figures were 1.6%. The Udis living in the region constituted 0.6% of the total population (Figure 2).

Result. One of the primary issues that is important to study in ethnodemographic studies is the aging process among ethnic minorities. Since the age composition data in the census materials are not provided for various regions, the research work included minority ethnic groups, namely Avars, Tsakhurs, and Udis, the vast majority of whom live in the Shaki-Zagatala economic region.

According to Figure 3, from 1999-2009, the share of elderly people among Avars increased by 0.6%, among Tsakhurs by 0.8%, among Udis by 4.5%, among Azerbaijanis by 0.6%, and among the total population of the country by 0.5% (Figure 3). The essential reason behind this change in each ethnic group was the decrease in the number of people



Fig 1. Ethnic settlement map of the economic region.

Source: Map was developed by the author based on G.J. Javadov's research and social-demographic survey conducted by the author.

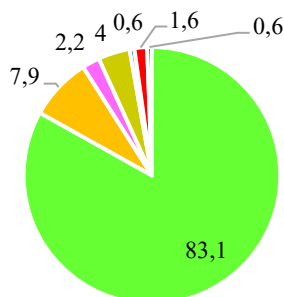
Note: The figures were given for 2019 since the last census was held in that year.

The figures for the ethnic minorities by various regions were only provided in the census materials

aged 0-4 and 5-9, that is, the decrease in the natality in the last decade led to an increase in the share of the elderly due to the decrease in the number of people in the lower age group in the total population. At the same time, traces of the high natural increase that existed before the Second World War, that is, from 1935 to 1939, can also be witnessed. The high natural increase recorded in those years affected a slight increase in the share of the elderly in 2009. However, the percentage increase in the share of the elderly was

distinct for each ethnic group. Thus, this indicator was higher than the national indicator for both minority groups and Azerbaijanis, but for Udis this percentage was 9 times higher than the national indicator. Generally, the cause of this highest indicator being recorded among Udis was related to the intensive participation of young people in migration processes.

In the second decade, the share of the elderly among the Avars also increased by 0.4%. However, this indicator decreased by 0.7 and 2.9% for the Tsakhurs and Lezgins respectively.



■ Azerbaijanian ■ Avar ■ Tsakhur ■ Lezgin ■ Udi ■ Inghiloi and Georgian ■ Others

Fig. 2. National and ethnic composition of the economic region (2019).

Source: (Population census materials in the Republic of Azerbaijan, 2019)

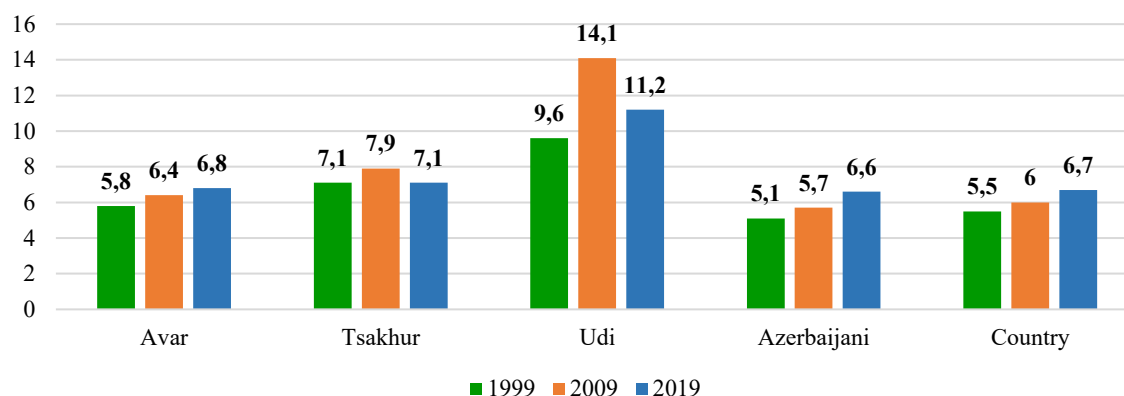


Fig. 3. Change in the population aging rate (share of the population over 65 years old) for minority ethnic groups, Azerbaijanis, and the country from 1999-2019 (in %).

Source: (Population census materials in the Republic of Azerbaijan, 2019)

khurs and Udis, respectively. There was an increase of 0.9% and 0.7% for the Azerbaijanis and the general population of the country, respectively. The increase in the share of the elderly among the Avars, Azerbaijanis, as well as the general population of the country, was due to a decrease in the share of those in the lower age groups due to a decrease in the natality as in the previous decade. However, among the Udis and Tsakhurs, in addition to the decrease in the share of the young generation due to a decrease in the birth rate, the decrease in the share of those in the 80-84 age group by up to 2 times during 2009-2019, i.e., the increase in mortality in that age group led to a slight decrease in the share of the elderly.

The analyses prove that population aging is seriously affected by the decline in the natality. Thus, over the past 20 years, the share of Udis in the 0-4 age group has decreased by approximately 4.5%, and by about 4% for Tsakhurs and Avars. However, this figure for the country's total population and Azerbaijanis has been more than 1%. This also indicates that the natural increase for these minority ethnic groups is lower than the national indicator. The provided diagrams give the details that the share of Avars, Tsakhurs, and Udis in the 30-44 age group has decreased relatively compared to the previous census (Figure 4).

This situation is due to the migration of people in that age group either to Baku or to other countries for business and other purposes [6]. In the Asian states, migration has a special role in the aging process of the population [19]. As a result of the socio-demographic survey conducted in the area, it was revealed that people in the indicated age group are intensively involved in migration processes, such as labor, education, and family migration. In some cases, people in this age group participate in migration processes together with their family members. Therefore, the migration balance in the region is mainly negative.

Provided that looking at the change in the migration balance from 1999 to 2023, it can be noticed that the economic region is one of the active migration regions. Except for some years, the migration balance in the region has been mainly negative (Figure 5). Thus, Azerbaijanis, as well as minority ethnic groups, actively participate in migration processes in the economic region [5]. The activity of the external migration process in the region was due to the location on the border with Russia and Georgia, the absence of visa requirements for travel, language, and job opportunities, the presence of relatives living abroad, especially the denser settlement of Avars, Tsakhurs, Lezgins and other minority ethnic groups in the migration region, and other "pull" factors. Generally, the three essential causes of migration in the region are labor activity, education, and changes in family status.

As a result of the general demographic analyses conducted, it is clear that other demographic indicators affect population aging and the effect is equal to the opposite effect, and population aging is also reflected in other demographic indicators (Figure 6). That is, when the population gets older, then the population of marriageable age declines which, in turn, affects the decline in natality and this makes way for an increasing share of the working-age and retired population.

Discussion. As can be noticed from the analysis of some demographic indicators, the decrease in the share of those in the lower age groups (up to 14 years) by various ethnic groups has led to an increase in the share of those of working age. Generally, the increase recorded in the share of those in the working age group in recent years has emerged as a result of the high natural growth in the Republic of Azerbaijan in previous years. The table below provides the change in the share of the working-age population from 1999 to 2019 by some minority ethnic groups, Azerbaijanis, and the total population of the country (Table 1).

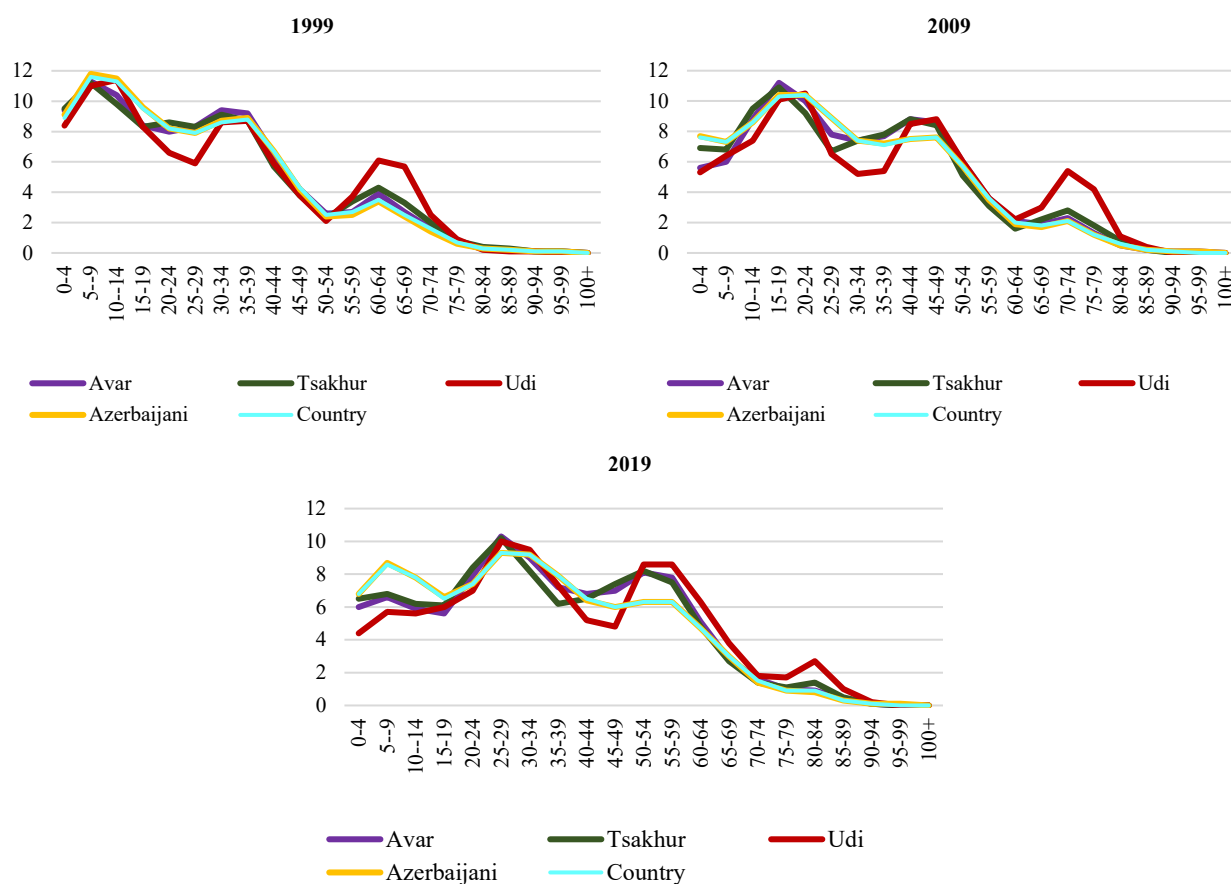


Fig. 4. Dynamics of age groups among Avars, Tsakhurs, Udis, Azerbaijanis, and the total population of the country from 1999-2019 (in %).

Source: Population census materials in the Republic of Azerbaijan, 2019)

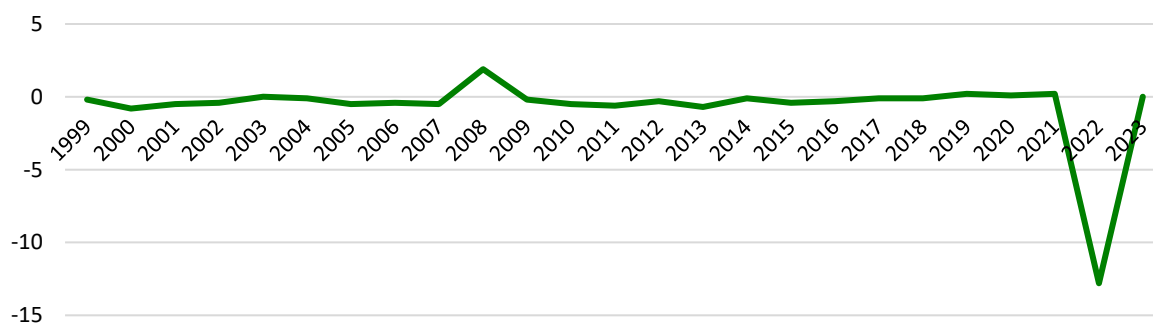


Fig. 5. Migration balance in the region from 1999-2023 (per thousand people).

Source: (Population of Azerbaijan, 1999-2023)

As can be noticed from the table, the share of the younger than working-age population has decreased significantly across all groups. This trend, which is a result of the decrease in marriages and, as a result, the decrease in births, as well as the increase in the marriageable age and divorces, is one of the main reasons for the increase in the share of the elderly. There, the increase in the share of the working-age population is the result of the high natural increase in the years before the country gained independence and in the first years of independence. This trend indicates the emergence of a demographic dividend in the country, as

well as in the study region.

The “demographic dividend” refers to the potential for economic growth due to the fact that the share of the working-age population in the total population exceeds the share of the non-working-age population, that is, the population under 14 years of age and over 65 years of age [10; 12]. That is, in this case, the large number of labor forces increases economic productivity and gives impetus to the economic development of the country. However, it should be taken into account that the demographic dividend has proven itself more in the city of Baku and the surrounding ar-

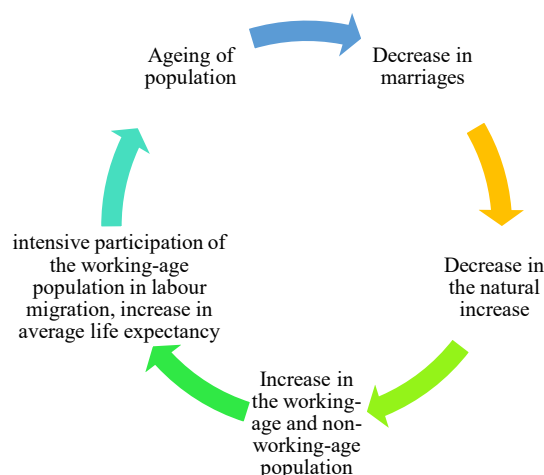


Fig. 6. Factors that influence and are affected by population aging

Table 1

Changes in the share of minority ethnic groups, Azerbaijanis, and the working-age population across the country (%)

Ethnoes	Younger than working-age population			Working-age population			Older than working-age population		
	1999	2009	2019	1999	2009	2019	1999	2009	2019
Avar	32,8	20,4	18,5	58,0	70,5	72,2	9,2	9,1	9,3
Tsakhur	32,0	23,2	19,5	57,0	66,7	71,1	11,0	10,1	9,4
Udi	32,6	19,0	15,8	53,0	63,7	70,2	14,4	17,3	14,0
Azerbaijani	34,4	23,6	23,3	57,4	68,2	67,9	8,2	8,2	8,8
Country	33,9	23,5	23,2	57,4	67,9	67,8	8,7	8,6	9,0

Source: (Population census materials in the Republic of Azerbaijan, 1999, 2009, 2019).

eas. The demographic dividend may not always culminate in positive results in practice. In particular, the very rapid occurrence of this process may lead to some problems in providing the population with business opportunities in appropriate areas. Especially in the first years of independence in Azerbaijan, the stagnation of the economic situation and the large number of working-age population, that is, the inverse proportion between these two indicators, gave impetus to the migration of people in this age group. However, in subsequent years, in order to eliminate the difficulties that arose in the country, the “State Programs on the Socio-Economic Development of Regions” (<https://www.economy.gov.az/az/page/regionlarin-inkisafi/dovlet-proqramlari/>) were implemented, and this problem has somewhat eliminated. However, the location of the primary business opportunities, especially workplaces regarding the non-agricultural sector, in Baku and its surrounding areas has accelerated the emigration of young people from the regions, and in this case, demographic indicators have affected the aging of the population in the regions. That is, the share of the elderly is starting to increase, as the migration of young people from the regions has a direct negative impact on marriages and the birth rate.

When calculating the Aging Index for various

minority ethnic groups, it is possible to see significant differences. From 1999-2019, the Aging Index increased from 19 to 37.3 for Avars, from 23 to 35.9 for Tsakhurs, from 34.5 to 63.9 for Udis, and from 14.5 to 28.4 for Azerbaijanis. This also indicates how many people per 100 people of the population are elderly for various ethnic groups. That is, in the last 20 years, the ratio of the share of elderly people to the share of children for both the total population of the country and minority ethnic groups has been approximately equal to 2. Although this indicator has been growing at a relatively slow pace for the country, it has been growing rapidly for minority ethnic groups.

The population aging process for ethnic minorities and Azerbaijanis has also seriously affected the age composition, and according to the demographic transition model based on age composition, although the country's total population, as well as ethnic minorities, transitioned from phase II to phase III from 1999-2019, this transition is currently approaching phase IV (Figure 7).

In addition to the Aging Index, the term Active Aging Index is also widely used in the literature. The Active Aging Index (AAI) is a concept that has been used in European policy for many years [11]. AAI refers to the working population of people over 65 or retired. Generally, there are several statements about

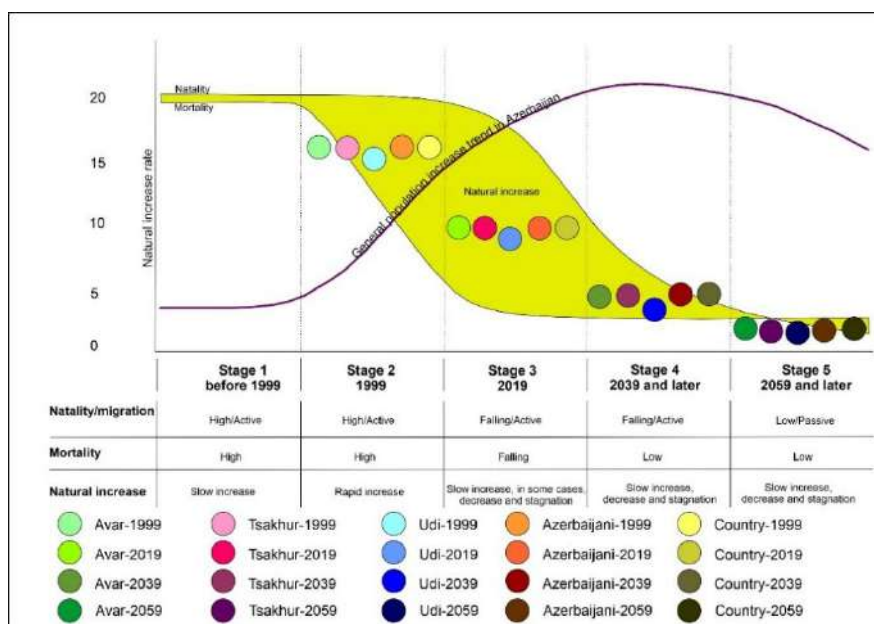


Fig. 7. A model of demographic transition phases for the previous (1999-2019) decades, and forecasting for 2039 and 2059.

Source: The graph was compiled by the author using Max Roser's "Demographic Transition Model" formation

active aging in the world. However, according to WHO, active aging is the process by which people optimize opportunities for health, safety, and participation to improve their quality of life as they age [15; 16; 17]. In several studies, the implementation of AAI is assessed as a positive phenomenon at the micro, meso, and macro levels, with the main positive aspects of this process including the physical and mental health of the elderly, an increase in the standard of living of the population, benefiting from the experience of the older generation, and other indicators [8; 24; 25]. However, it should be noted that the AAI varies depending on the country's socio-economic development level and may not always indicate positive results. According to studies, compared to EU countries, China and South Korea, the AAI in Azerbaijan

is 32.6 (the highest is Sweden - 44.9, the lowest is Greece - 27.6) [1]. The AAI is generally based on 4 main criteria: employment; participation in society; independent, healthy, and safe life; and favorable environment for active aging. Azerbaijan ranks lowest among the countries surveyed in terms of employment level among these four indicators. Undoubtedly, there are several reasons for the low employment rate. If we look at the change in the number of employed people over working age in the study region from 1999-2019 (the indicators are given for the entire region, since there is no information in the census materials for ethnic minorities), it can be noticed that there are significant differences by region, year, and gender (Table 2).

Commonly, the leading causes for the differen-

Table 2

Change in the number of employed population older than working age (in people)

	1999*			2009*			2019*		
	male	female	total	male	fe- male	total	male	fe- male	total
Balakan	436	413	849	767	1064	1831	519	1284	1803
Gakh	568	534	1102	530	832	1362	415	1145	1560
Gabala	719	565	1284	699	834	1533	685	1619	2304
Oghuz	332	296	628	276	306	582	273	595	868
Shaki	1061	907	1968	1343	1691	3034	1085	2628	3713
Zagatala	753	621	1374	900	1196	2096	644	1740	2384
Regions	3869	3336	7205	4515	5923	10438	3621	8975	12596

* In 1999, the retirement age for men was 60 years for men and 55 years for women;

*In 2009, it was 61 years old for men and 56 years old for women;

*In 2019, it was 63.5 years for men and 60.5 years for women.

Note: There is no data on the ethnic composition of the employed population over 65 years of age, therefore, the data are provided for the entire population.

Source: (Population census materials in the Republic of Azerbaijan-2019, 2022)

ces that arise in administrative districts depend on the number of people living in those regions, especially the number of urban residents and job opportunities. In the economic region, Shaki, Zagatala, and Gabala districts have more job opportunities than the other three districts, but the majority of employees work in the non-state sector (especially small and medium-sized enterprises) and they are day laborers. For this reason, in several cases, they are not considered employed. Typically, the majority of the employed population given in the numerical indicators settle in urban areas.

In the period between 1999 and 2019, the incre-

ase in the number of employed people over the working age in the regions is due to the increase in the number of women from this group. First, this difference in the sex ratio in 1999 compared to 2019 was due to the fact that the retirement age of women was lower than that of men. The second main reason is that the number of women of retirement age was higher than that of men. In particular, factors such as the high number of diseases among men (diseases resulting from harmful habits such as alcoholism and others), participation in migration, etc., led to a violation of the sex ratio in the older age group, or more precisely, to a higher share of women.

Ethnoses	Age groups	Share	Trend	Pyramid	Share	Trend	Pyramid	Share	Trend	Pyramid
Avar	YWAP	-14.3			-4.4			-1.2		
	WAP	+14.2			-14.6			-12.3		
	OWAP	+0.1			+19.0			+13.5		
Tsakhur	YWAP	-12.5			-4.4			-1.3		
	WAP	+14.1			-13.6			-10.2		
	OWAP	-1.6			+18.0			+11.5		
Udi	YWAP	-16.8			-3.3			-0.2		
	WAP	+17.5			-12.7			-10.3		
	OWAP	-0.4			+16.0			+10.5		
Azerbaijani	YWAP	-11.1			-5.8			-1.7		
	WAP	+10.5			-8.5			-9.7		
	OWAP	+0.6			+14.3			+11.4		
Country	YWAP	-10.7			-5.7			-1.7		
	WAP	+10.4			-8.5			-9.6		
	OWAP	+0.3			+14.2			+11.3		
1999-2019 III Phase				2019-2039 IV Phase				2039-2059 V Phase		

Fig. 8. Change in population share by age group in 1999-2019 and forecast for 2039-2059.

*YWOP-Younger than working-age population; WAP-Working-age population;
OWOP-Older than working-age population.

Note: While making the projections for the years 2039 and 2059, the previous and current demographic situations, except for unexpected factors like contagious diseases and others, were considered

What are the opportunities for increasing active aging in the region, both for the general population and for ethnic minorities? The number of working-age people is currently increasing, both in the country, the study region, and among ethnic minorities living in the region, and this growth will continue in the coming decades (Figure 8). Specifically, the retirement age for women will be 65 after July 1, 2026 (currently it is 64 for women), which will have a

certain impact on the number of people of working age [29]. This will increase the need for brand-new workplaces. Similarly, the number of people over working age continues to increase on a trend line.

Currently, one of the main principles of the state policy aimed at improving the socio-economic situation in the regions is the increase in new business opportunities, which will lead to a significant increase in the AAI after 2055 (this year is indicated taking

into account the high natural growth rate until 1990). Thus, although there will be a decrease in the mentioned age group after 2050 due to the transition of working-age people to retirement age, there will be a significant increase in the number of pensioners, and the sufficient number of jobs will increase the AAI.

Conclusion. As a final conclusion, it can be emphasized that in the 20-year period covering 1999-2019, the share of the elderly among ethnic groups (except Avars) and Azerbaijanis increased by more than 1%. This demographic trend can be linked to trends in other demographic indicators, in particular, the migration of young people, the decline in the birth rate as a result of the decline in marriages. This is evidenced by territorial studies and socio-demographic surveys. Moreover, as a natural phenomenon, the increase in the share of the elderly also has a negative impact on other demographic indicators, triggering their change over time.

The aging index indicators also moved in an increasing trend from 1999-2019. At the same time, the increase in the Active Aging Index, which is increasing even more rapidly due to the increase in the

retirement age of women, has accelerated and will continue to accelerate the transition to demographic phases, along with headlighting the unemployment issues. In the model prepared based on changes in age groups, the population, as well as minority ethnic groups, moved from phase II of the demographic transition to phase III from 1999-2019 and is currently approaching phase IV. According to the forecast, by 2059, due to the high natural increase recorded in previous years, the share of the elderly in the total population and among minorities will have increased significantly. This will result in a regressive demographic situation in the country.

The conducted analyses and obtained results indicate that the adoption of new programs in the field of demography can partially eliminate this problem. Therefore, in the future, there is a great need to conduct research on the analysis of demographic aspects of aging in various regions of the country or across the country, especially on the stabilization of the age balance and the development of demographic development models for Sustainable Population Growth.

Bibliography

1. Active Aging Index "AAI" for Azerbaijan (A comparison with EU countries). (2021). UNFPA-Ministry of Labour and Social Protection of Population of the Republic of Azerbaijan. 48.
2. Dyson, T. (2010). *Population and Development: The Demographic Transition*. *Progress in Development Studies Journal*, 11(3), 251-261. <https://doi.org/10.1177/146499341001100307>
3. Dörflinger, M., Potančoková, M., & Marois, G. (2024). The potential impact of international migration on prospective population ageing in Asian countries. *Asian Population Studies*, 1–21. <https://doi.org/10.1080/17441730.2024.2436201>
4. Fernanades, F., Turra, C.M., Rios-Neto, E.L. (2023). World population aging as a function of period demographic condition. "Demographic Research" journal, 48, 353-372. <https://doi.org/10.4054/DemRes.2023.48.13>
5. Huseynova, B.A. (2021). National-ethnic characteristics of demographic development in the northern regions of Azerbaijan (on the example of the Shaki-Zagatala economic-geographical region). *Geography and tourism*. 64, 70-77. <https://doi.org/10.17721/2308-135X.2021.64.70-77>
6. Huseynova, B.A. (2022). A young adult migration factor in the formation of the sex-age composition of the ethnic minority groups population in the Shaki-Zagatala economic region. *Journal of Young Scientists*. 2, 78–86.
7. Imrani, Z., Huseynova, B. (2024). Ethno-tourism potential of the Shaki-Zagatala economic region: opportunities and challenges. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (60), 215-230. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-15>
8. Lamura, G., Principi, A., Di Rosa, M. (2019). 2018 Active Aging Index Analytical Report. Geneva and Brussels: United Nations Economic Commission for Europe and European Commission: 93.
9. Lee, R. (2003). The demographic transition: Three centuries of fundamental change. *Journal of Economic Perspectives* 17(4), Pennsylvania, 167–190. <https://doi.org/10.1257/089533003772034943>
10. Lee, R. Mason, A. (2006). What is the Demographic Dividend? Back to Basics. *Finance and Development Journal*. 43(3), 11-35
11. López-López, R., Sánchez, M. (2020). The institutional active aging paradigm in Europe (2002–2015). *The Gerontologist*. 60, 406–415.
12. Mason, A. (2006). *Population Aging and Demographic Dividends: The Time to Act is Now*, Asia-Pacific Population Journal, 21(3), 7-16. <https://doi.org/10.18356/d012ef2c-en>
13. National Research Council (US) Panel on a Research Agenda and New Data for an Aging World. *Preparing for an Aging World: The Case for Cross-National Research*. [Electronic resource] URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK98379/> doi: <https://doi.org/10.17226/10120>
14. Niemets, L., Segida, K., & Guseva, N. (2015). Demographic potential as the basis for social and economic development. *Economic Annals-XXI*, 3-4(1), 93-97. <https://ea21journal.world/index.php/ea-v149-22/>
15. Paltore, E.B. (1995). Successful aging. In Maddox GL (ed.), *Encyclopedia of Aging: A Comprehensive Resource in Gerontology and Geriatrics*, 914–915.
16. Rowe, J., Kahn, R. (1987). Human aging: usual and successful. *Science*. 237, 143–149.
17. Rowe, J., Kahn, R. (1997). Successful aging. *The Gerontologist*. 37, 433–440.
18. Trnavčević, N., & Knežević, A. (2023). The demographic approach to the quality of official ethnicity data in Serbia – a research proposal. *Stanovništvo*, 61(1), 17–33. <https://doi.org/10.2298/STNV220416004T>

19. Trong, Nguyen & Dong, Nguyen & Ly, Pham. (2024). Population aging and economic growth: evidence from ASEAN countries. *Cogent Business & Management*. 11. <https://doi.org/10.1080/23311975.2023.2298055>
20. Turkulov, V, Nadežda, M-S, Čedomir, G. (2007). Demographic aspect of aging. *Medicinski predleg journal*, 60(5-6), 247-250. <https://doi.org/10.2298/MPNS0706247T>
21. UN Department of Economic and Social Affairs Population Division. Population aging and sustainable development. (2017). *POPFacts*, No. 2017/1
22. Why population aging matters. A Global Perspective. (2007). National Institute on Aging, National Institutes of Health, U.S. Department of Health and Human Services, USA: 32.
23. World Population Aging 2023. (2023). Department of Economic and Social Affairs-Population Division, USA: 74.
24. Principi A, Di Rosa M, Domínguez-Rodríguez A, et al. (2023). The Active Aging Index and policy-making in Italy. *Aging and Society*. 43(11). 2554-2579. <https://doi.org/10.1017/S0144686X21001835>
25. Walker, A. (2011). *The Future of Aging Research in Europe: A Road Map*. UK: 120.
26. Azərbaycanın demografik göstəriciləri-2023. (2024). Bakı: Azərbaycan Respublikası Dövlət Statistika Komitəsi. 614.
27. Eminov, Z.N. (2005). *Azərbaycan əhalisi*. Bakı: 558.
28. Мельник, Н., Мельник, А., Пересадыко, В., & Великочий, В. (2021). Демографічні процеси Карпатського регіону в контексті економічного розвитку території. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*, (55), 187-203. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-55-14>.
29. Azərbaycan Respublikası Əmək və Əhalinin Sosial Müdafiəsi Nazirliyi: [Elektron mənbə] URL: <https://social.gov.az/fealiyyet/destek-istiqametleri/pensiya/pensiya/yasa-gore-emek-pensiyasi>.
30. Azərbaycan Respublikasında əhalinin siyahıyaalınma materialları-2019. (2022). Bakı: Azərbaycan Respublikası Dövlət Statistika Komitəsi. Cild I, 682.
31. Azərbaycan Respublikasında əhalinin siyahıyaalınma materialları-2019. (2022). Bakı: Azərbaycan Respublikası Dövlət Statistika Komitəsi. Cild XXI, 810.
32. Azərbaycanın əhalisi-2023. (2023). Bakı: Azərbaycan Respublikası Dövlət Statistika Komitəsi. 137.
33. Сільченко, Ю. Ю., & Семенюк, Л. Л. (2017). Суспільно-географічний аналіз міграційних процесів у Кіровоградській області. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*, (45), 134-138. вилучено із <https://periodicals.karazin.ua/geoeo/article/view/8189>

References

1. Active Aging Index “AAI” for Azerbaijan (A comparison with EU countries). (2021). UNFPA-Ministry of Labour and Social Protection of Population of the Republic of Azerbaijan. 48.
2. Dyson, T. (2010). Population and Development: The Demographic Transition. *Progress in Development Studies Journal*, 11(3), 251-261. <https://doi.org/10.1177/146499341001100307>
3. Dörflinger, M., Potančoková, M., & Marois, G. (2024). The potential impact of international migration on prospective population ageing in Asian countries. *Asian Population Studies*, 1–21. <https://doi.org/10.1080/17441730.2024.2436201>
4. Fernanades, F., Turra, C.M., Rios-Neto, E.L. (2023). World population aging as a function of period demographic condition. “Demographic Research” journal, 48, 353-372. <https://doi.org/10.4054/DemRes.2023.48.13>
5. Huseynova, B.A. (2021). National-ethnic characteristics of demographic development in the northern regions of Azerbaijan (on the example of the Shaki-Zagatala economic-geographical region). *Geography and tourism*. 64, 70-77. <https://doi.org/10.17721/2308-135X.2021.64.70-77>
6. Huseynova, B.A. (2022). A young adult migration factor in the formation of the sex–age composition of the ethnic minority groups population in the Shaki–Zagatala economic region. *Journal of Young Scientists*. 2, 78–86.
7. Imrani, Z., Huseynova, B. (2024). Ethno-tourism potential of the Shaki-Zagatala economic region: opportunities and challenges. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (60), 215-230. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-15>
8. Lamura, G., Principi, A., Di Rosa, M. (2019). 2018 Active Aging Index Analytical Report. Geneva and Brussels: United Nations Economic Commission for Europe and European Commission: 93.
9. Lee, R. (2003). The demographic transition: Three centuries of fundamental change. *Journal of Economic Perspectives* 17(4), Pennsylvania, 167–190. <https://doi.org/10.1257/089533003772034943>
10. Lee, R. Mason, A. (2006). What is the Demographic Dividend? Back to Basics. *Finance and Development Journal*. 43(3), 11-35
11. López-López, R., Sánchez, M. (2020). The institutional active aging paradigm in Europe (2002–2015). *The Gerontologist*. 60, 406–415.
12. Mason, A. (2006). Population Aging and Demographic Dividends: The Time to Act is Now, Asia-Pacific Population Journal, 21(3), 7-16. <https://doi.org/10.18356/d012ef2c-en>
13. National Research Council (US) Panel on a Research Agenda and New Data for an Aging World. Preparing for an Aging World: The Case for Cross-National Research: [Electronic resource] URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK98379/> doi: <https://doi.org/10.17226/10120>
14. Niemets, L., Segida, K., & Guseva, N. (2015). Demographic potential as the basis for social and economic development. *Economic Annals-XXI*, 3-4(1), 93-97. <https://ea21journal.world/index.php/ea-v149-22/>
15. Paltmore, E.B. (1995). Successful aging. In Maddox GL (ed.), *Encyclopedia of Aging: A Comprehensive Resource in Gerontology and Geriatrics*, 914–915.
16. Rowe, J., Kahn, R. (1987). Human aging: usual and successful. *Science*. 237, 143–149.
17. Rowe, J., Kahn, R. (1997). Successful aging. *The Gerontologist*. 37, 433–440.
18. Trnavčević, N., & Knežević, A. (2023). The demographic approach to the quality of official ethnicity data in Serbia – a research proposal. *Stanovništvo*, 61(1), 17–33. <https://doi.org/10.2298/STNV220416004T>

19. Trong, Nguyen & Dong, Nguyen & Ly, Pham. (2024). Population aging and economic growth: evidence from ASEAN countries. *Cogent Business & Management*. 11. <https://doi.org/10.1080/23311975.2023.2298055>
20. Turkulov, V, Nadežda, M-S, Čedomir, G. (2007). Demographic aspect of aging. *Medicinski predleg journal*, 60(5-6), 247-250 <https://doi.org/10.2298/MPNS0706247T>
21. UN Department of Economic and Social Affairs Population Division. Population aging and sustainable development. (2017). *POPFacts*, No. 2017/1
22. Why population aging matters. A Global Perspective. (2007). National Institute on Aging, National Institutes of Health, U.S. Department of Health and Human Services, USA: 32.
23. World Population Aging 2023. (2023). Department of Economic and Social Affairs-Population Division, USA: 74.
24. Principi A, Di Rosa M, Domínguez-Rodríguez A, et al. (2023). The Active Aging Index and policy-making in Italy. *Aging and Society*. 43(11). 2554-2579. <https://doi.org/10.1017/S0144686X21001835>
25. Walker, A. (2011). *The Future of Aging Research in Europe: A Road Map*. UK: 120.
26. Demographic indicators of Azerbaijan-2023. (2024). Baku: State Statistical Committee of the Republic of Azerbaijan. 614 [in Azerbaijani].
27. Eminov, Z.N. (2005). *Population of Azerbaijan*. Baku: 558 [in Azerbaijani].
28. Melnyk, N.V., Melnyk, A.V., Peresadko, V.A., Velykochy, V.S. (2021). Demographic processes of the Carpathian region in the context of economic development of the territory. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (55), 187-203. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-55-14> [in Ukrainian].
29. Ministry of Labour and Social Protection of Population of the Republic of Azerbaijan: [Electronic resource] URL: <https://sosial.gov.az/fealiyyet/destek-istiqametleri/pensiya/pensiya/yasa-gore-emek-pensiyasi> [in Azerbaijani].
30. Population census materials in the Republic of Azerbaijan-2019. (2022). Baku: State Statistical Committee of the Republic of Azerbaijan. I, 682 [in Azerbaijani].
31. Population census materials in the Republic of Azerbaijan-2019. (2022). Baku: State Statistical Committee of the Republic of Azerbaijan. XXI, 810 [in Azerbaijani].
32. Population of Azerbaijan-2023. (2023). Baku: State Statistical Committee of the Republic of Azerbaijan. 137 [in Azerbaijani].
33. Silchenko, Y.Y., Semenyuk, L.L. (2017). Social and geographic analysis of the migration processes in Kirovograd region. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*, (45), 134-138. [in Ukrainian].

Етнодемографічні аспекти старіння населення в Азербайджані (на прикладі Шекі-Загатальського економічного району)

Байімханім Гусейнова

аспірант, наук. співробітник,

Інститут географії імені академіка Гасана Алієва,

Міністерство освіти і науки Азербайджанської Республіки, Баку, Азербайджан

Це дослідження досліджує етнодемографічні аспекти старіння населення в Шекі-Загатальському економічному регіоні північно-західного Азербайджану, районі, що характеризується значним етнічним різноманіттям. Основні цілі включають аналіз динаміки вікової структури серед етнічних груп протягом останніх десятиліть, оцінку ступеня старіння населення та його демографічних детермінант, розрахунок індексу старіння (ІС) та надання майбутніх прогнозів на основі сучасних тенденцій. Методологічно дослідження використовує структурно-функціональний аналіз, історичне та географічне моделювання, узагальнення та польові дослідження для поглибленого регіонального розуміння. Результати дослідження показують, що між 1999 і 2019 роками частка осіб віком 65 років і старше зросла серед етнічних меншин, азербайджанців та населення загалом. Цей зсув значною мірою пояснюється зниженням рівня народжуваності, про що свідчить скорочення вікових когорт 0-4 та 5-9 років, а також зростанням тривалості життя. Крім того, зовнішня міграція, особливо серед осіб репродуктивного та працездатного віку, посилює скорочення молодших когорт населення, тим самим прискорюючи процеси старіння. У дослідженні робиться висновок, що старіння населення посилюється у всіх групах регіону, що зумовлено стійким зниженням народжуваності та збільшенням тривалості життя. Індекс старіння демонстрував стабільне зростання з 1999 по 2019 рік, що відображає цю демографічну трансформацію. Аналіз, заснований на теорії демографічного переходу, вказує на перехід від другої до третьої фази протягом цього періоду, причому регіон зараз наближається до четвертої фази. Прогнози показують, що до 2059 року частка людей похилого віку значно зросте як серед населення загалом, так і серед етнічних меншин, що є тенденцією, що ґрунтується на історично високому природному прирості. Очікується, що ця траєкторія призведе до регресивної демографічної структури, що характеризуватиметься скороченням населення працездатного віку та зростанням коефіцієнта залежності, що може створити суттєві проблеми для державної політики, ринків праці та системи охорони здоров'я.

Ключові слова: Азербайджан, Шахі-Загата, етнічні меншини, етнодемографічні фактори, старіння населення, індекс старіння, індекс активного старіння, прогноз.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 9 лютого 2025 р.

Прийнята 28 квітня 2025 р.

ЕКОЛОГІЯ

<https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-29>

УДК 504.064:556.5:519.876.5(477)

Надійшла 1 квітня 2025 р.

Прийнята 2 травня 2025 р.

Сезонно-просторова динаміка ентропійно-зваженої оцінки якості поверхневих вод України

Віталій Безсонний¹

к. техн. н., доцент, кафедра готельного, ресторанного бізнесу і крафтових технологій,
¹ Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, Харків, Україна,
e-mail: bezsonny@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0001-8089-7724>;

Олег Третьяков²

д. техн. н., професор, кафедра цивільної та промислової безпеки імені Героя України Чуба О.С.,
Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна,
e-mail: mega_ovtr@ukr.net,  <https://orcid.org/0000-0002-0457-9553>;

Леонід Пляцук³

д. техн. н., професор, зав. кафедри екології та природоохоронних технологій,
Сумський державний університет, Суми, Україна,
e-mail: l.plyacuk@ecolog.sumdu.edu.ua,  <https://orcid.org/0000-0003-0095-5846>;

Роман Пономаренко⁴

д. техн. н., професор, т.в.о. начальника Інституту наукових досліджень з цивільного захисту,
Національний університет цивільного захисту України, Київ, Україна,
e-mail: indcz@nuczu.edu.ua,  <https://orcid.org/0000-0002-6300-3108>;

Оксана Давидова¹

д. екон. н., професор, зав. кафедри готельного, ресторанного бізнесу і крафтових технологій,
e-mail: davydova_oks@ukr.net,  <https://orcid.org/0000-0003-3045-9464>

У статті розглянуто підхід до оцінювання якості поверхневих вод України на основі ентропійно-зваженого індексу з урахуванням сезонної та просторової динаміки. В умовах посилення антропогенного тиску та кліматичних змін зростає актуальність удосконалення методик екологічного моніторингу, що базуються на об'єктивному врахуванні варіабельності гідрохімічних параметрів. Ентропія, як кількісна міра невизначеності, застосовується для зважування інформативності кожного показника якості води, дозволяючи створити більш чутливий і достовірний інтегральний індекс, ніж традиційний. Для аналізу використано відкриті дані державного моніторингу якості води за понад 540 пунктами спостережень у річкових басейнах України (Дніпро, Дністер, Дунай, Дон, Вісла, Південний Буг, Приазов'я та Причорномор'я). Було враховано п'ять сезонних періодів (зима, весна, межень, мілководдя, осінь) і 10 ключових гідрохімічних показників. Розраховані значення ентропійно-зваженого індексу класифікувались за семикласною шкалою, що дозволило виявити найбільш забруднені регіони та періоди. Результати демонструють чітку сезонну диференціацію: найчистіша вода спостерігається взимку та навесні, тоді як найбільш критичні значення фіксуються у період мілководдя та восени. Особливо забрудненими виявились басейни Південного Бугу, Причорномор'я та Приазов'я, що потребує пріоритетного екологічного втручання. Ентропійно-зважений індекс продемонстрував високу чутливість до просторово-часових змін, виявивши вплив як природних (гідрологічні умови), так і техногенних факторів (промислові та сільськогосподарські скиди). Проведено картографування результатів, що дозволяє візуалізувати екологічний стан річкових систем та сприяє прийняттю рішень у сфері водної політики. Запропонована методика має потенціал для впровадження в системи екологічного моніторингу та планування заходів з управління якістю води на регіональному рівні.

Ключові слова: ентропійно-зважений індекс забрудненості води (EI3B); поверхневі води; екологічний моніторинг; сезонна варіація; просторовий аналіз.

Як цитувати: Безсонний Віталій, Третьяков Олег, Пляцук Леонід, Пономаренко Роман, Давидова Оксана (2025). Сезонно-просторова динаміка ентропійно-зваженої оцінки якості поверхневих вод України. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (62), 384-400. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-29>

In cites: Bezsonnyi Vitalii, Tretyakov Oleg, Plyatsuk Leonid, Ponomarenko Roman, Davydova Oksana (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> [in Ukrainian]

Вступ. Забезпечення екологічної безпеки водних басейнів є надзвичайно актуальним завданням у світлі виконання Цілей сталого розвитку ООН, зокрема ЦСР 6 («Чиста вода та санітарія»)

та ЦСР 12 («Раціональне споживання і виробництво»). Вода відіграє ключову роль у підтримці сталого розвитку держав, проте зростання антропогенного тиску та кліматичні трансформації

© Безсонний Віталій, Третьяков Олег, Пляцук Леонід, Пономаренко Роман, Давидова Оксана, 2025

суттєво ускладнюють стабільне функціонування природних гідросистем і систем водопостачання. За оцінками ООН, близько 40% населення світу відчуває дефіцит водних ресурсів, а понад 1,7 мільярда осіб, які проживають у річкових басейнах, потребують поліпшення систем постачання безпечної води. Зокрема, 783 мільйони осіб не мають доступу до чистої питної води, що не лише впливає на добробут населення, але й прямо стосується дотримання фундаментальних прав людини. У межах проєкту «ЕкоЗагроза» в Україні ведеться моніторинг у понад 540 контрольних точках, де виявлено перевищення допустимих концентрацій токсичних речовин, зокрема пестицидів і важких металів. У першій половині 2024 року підприємства завдали збитків на понад 21 мільйон гривень через порушення водоохоронного законодавства. Це підкреслює необхідність впровадження нових методик оцінювання стану водних ресурсів та стратегічного планування екологічної безпеки басейнів.

Комплексний аналіз літератури показує, що ефективне оцінювання сезонної та просторової динаміки якості поверхневих вод вимагає застосування сучасних цифрових технологій, методів аналітичної обробки даних та інтегрованого екологічного підходу. Історично, концепція індексного підходу бере початок із 1965 року, коли Хортон запропонував першу модель індексу якості води на основі емпіричних даних і порівняльного аналізу [1 – 6]. Методологія передбачала вибір релевантних показників, їхнє зважування залежно від значущості та створення шкали для інтегрування числового індексу. Водночас сучасна практика все частіше віддає перевагу ентропійно-зваженим індексам, які демонструють вищу чутливість і точність при виявленні регіональних або сезонних змін у якості води [7 – 9].

Ентропія в оцінці якості води застосовується як кількісна характеристика невизначеності у розподілі хімічних компонентів та забруднюючих речовин у водному середовищі. Такий підхід дозволяє оцінити ступінь хаотичності або варіативності системи, що є надзвичайно важливим для аналізу стану екосистем водних об'єктів [7 – 9].

Інтегральна оцінка якості води за допомогою ентропійно-зваженого індексу базується на моделі Water Quality Index (WQI), яка враховує низку гідрохімічних параметрів, зокрема загальну мінералізацію, біохімічне споживання кисню, рН тощо [10, 11]. Кожен із цих параметрів відіграє різну роль у формуванні загального екологічного профілю водойми і тому отримує індивідуальну вагу, розраховану відповідно до його інформаційної ентропії.

На відміну від підходів, де вагові коефіцієнти визначаються експертно, методика з використан-

ням ентропії дозволяє врахувати фактичну мінливість параметрів у різних точках моніторингу. Чим вища мінливість або ентропія параметра, тим більшою є його впливовість і, відповідно, вища вага в інтегральному індексі [12].

Такий підхід дозволяє уникнути суб'єктивності у визначенні вагових коефіцієнтів, яка притаманна традиційним методам, де всі параметри часто розглядаються як рівнозначні або ваги задаються за емпіричними оцінками [13]. Як наслідок, значна частина критично важливої інформації про якість води може бути втрачена. Агрегування нормованих значень параметрів з урахуванням їхніх ентропійних ваг формує підсумковий показник – ентропійно-зважений індекс забрудненості води (ЕІЗВ). Так, дослідники [14] вперше продемонстрували застосування ЕІЗВ для оцінки якості підземних вод у регіоні Ленджанат (Іран), де було доведено, що ентропійна вага значно покращує чутливість індексу до гідрохімічних змін. Подібне дослідження у сільській місцевості Індії представлено у роботі [15], де ЕІЗВ застосовували у поєднанні з аналізом просторового розподілу іонів. У контексті країн Глобального Півдня проаналізовано якість ґрунтових вод у місті Ібадан (Нігерія), використовуючи саме ентропійно-зважений підхід. Дослідники виявили, що найбільший вплив на якість питної води мали нітрати та важкі метали, розподілені нерівномірно залежно від типу ґрунту [16]. У Південній Африці, дослідженням зосереджено увагу на сезонній динаміці якості поверхневих вод, інтегруючи дані з Google Earth Engine та супутникових знімків Sentinel-2 для аналізу змін у водних площах та пов'язаного з ними забруднення [17]. Оцінка просторово-сезонної варіативності також представлена в роботі [18], де було здійснено аналіз забруднення ґрунтових вод із застосуванням ентропійних методів, що продемонстрували вищу ефективність порівняно з традиційними індексами. У роботі [19] реалізували багатофакторний підхід до класифікації ґрунтових вод Ірану, інтегруючи ЕІЗВ та індекс просторової автокореляції, що дозволило не лише оцінити якість води, але й виділити регіони з найбільшим ризиком забруднення. У дослідженні прибережних вод Бангладешу запропонували комбінацію модифікованого інтегрованого індексу якості води з ентропійно-зваженим, щоб зменшити перекоси через крайові значення параметрів. Вони довели, що така інтеграція забезпечує стабільніші результати під час сезонних змін [20]. Ще одним значним внеском є робота [21], яка застосовувала ЕІЗВ у сільській місцевості штату Телангана (Індія). Результати вказали на те, що параметри, пов'язані з антропогенним тиском, мають вищу ентропійну значимість. У Нігерії [22] впроваджено багатопоказникову систему оціню-

вання якості води, де ЕІЗВ поєднувався з іншими індексами, зокрема іонного забруднення. Такий підхід дозволив детально класифікувати джерела питної води за рівнем ризику. У роботі [23] здійснено комплексну гідрохімічну оцінку ґрунтових вод для потреб зрошення та питного водопостачання в південній Індії. Дослідження підтвердило ефективність ентропійно-зваженого аналізу у поєднанні з традиційними методами (наприклад, ІЗВ та індекс надійності). У подібному ключі, [24] провели дослідження у міських і передміських районах Ібадану (Нігерія), де особливу увагу приділили впливу урбанізації на якість поверхневих вод. Аналіз проводився з використанням ентропійного підходу та кластерного аналізу для виявлення просторових аномалій. Дослідниками [25] проаналізовано якість води у побутових джерелах у південно-західній Нігерії. ЕІЗВ продемонстрував високу чутливість до підвищених концентрацій заліза та нітратів, що пов'язані з інтенсивним сільськогосподарським навантаженням. В Африці особливо цікавим є дослідження [26], яке розглядало сезонну та просторову варіативність водних параметрів в мангровому гірлі річки Ньонг (Камерун). Використання мультिवаріантного аналізу дозволило виявити сезонно-специфічні патерни забруднення. Робота [27] досліджує вплив землекористування на сезонну змінність якості води озера Мухазі (Руанда). Автори інтегрували ГІС-дані та індекси якості води, що дозволило детально відтворити просторову структуру забруднення і його залежність від сільськогосподарських і урбанізованих територій. У дослідженні [28] було застосовано багатовимірний статистичний аналіз до оцінки якості поверхневих вод у південній Нігерії. Автори підкреслюють перевагу поєднання ентропійної ваги з факторним аналізом для класифікації гідрохімічних типів вод. В роботі [29] запропоновано модель оцінки якості води в місці злиття річок Вей та Хуанхе (Китай), яка поєднує ЕІЗВ, аналіз основних компонентів та картографічну візуалізацію. Виявлено сильну сезонну залежність забруднення та локальні джерела впливу. У дослідженні [30] розглянуто вплив цифровізації на економічні процеси, однак їхня модель обробки даних є релевантною і для моніторингу екологічних систем. Розроблені алгоритми дозволяють об'єднувати великі обсяги інформації, враховуючи просторово-часові зміни, що у контексті водних досліджень дає змогу моделювати зміни якості води залежно від зовнішніх впливів у режимі реального часу. У статті [31] запропоновано побудову зон сумнівних рішень у багатовимірних просторах небезпечних факторів. Хоча початково ця методика була орієнтована на техногенні системи, підхід до розмежування зон ризику за допомогою багатофакторного аналізу

чудово адаптується для класифікації водних басейнів за рівнем екологічної небезпеки на основі ентропійно-зважених показників. Робота [32] присвячена оцінці структурних змін у сталому розвитку. Автори акцентують увагу на системному підході до динамічного аналізу складних систем. Перенесення цих принципів на екологічні дослідження дозволяє краще зрозуміти, як сезонні зміни впливають на функціонування водних екосистем, зокрема в умовах антропогенного навантаження. Дослідники [33] у своїй статті формують науково-теоретичні засади стратегії розвитку територій, акцентуючи на необхідності врахування просторово-часових змін при прийнятті управлінських рішень. Для нашого дослідження це важливо тим, що дозволяє обґрунтувати інтеграцію екологічних показників (зокрема сезонно-зважених індексів якості води) у системи стратегічного планування управління водними басейнами. У роботі [34] представлено аналіз застосування методів машинного навчання та предиктивної аналітики для аналізу посткризових тенденцій. Використання аналогічних інструментів у екологічних дослідженнях дозволить прогнозувати зміну якості води залежно від сезонних впливів, що має практичне значення для адаптивного управління водними ресурсами.

Безпосередньо до тематики інтегрованої оцінки водних ресурсів належить дослідження [35]. У роботі здійснено багатопараметричну оцінку стану джерел водопостачання на основі показників екологічного ризику. Автори використовували підходи, що враховують не лише фізико-хімічні показники, але й їхню просторово-часову змінність, що важливо для оцінки сезонних коливань якості води. Моделювання кисневого режиму водосховища, проведене у роботі [36], дозволяє зрозуміти динаміку біохімічного споживання кисню в залежності від температурних і сезонних чинників. Врахування таких змін є критичним для правильного розрахунку ентропійно-зважених індексів. Термодинамічний підхід до аналізу екологічних систем, запропонований у роботі [37], дозволяє глибше осмислити механізми деградації екосистем під впливом антропогенних чинників. Концепція антиентропії як індикатора стабільності системи може бути застосована для моніторингу змін екологічного стану водойм у довгостроковій перспективі. Огляд [38] зосереджується на використанні інформаційної ентропії у системах моніторингу водних ресурсів. Автор продемонстрував, що оптимальне розташування пунктів спостереження значно підвищує інформативність моніторингу та ефективність виявлення просторово-часових змін у якості води. Вплив військових дій на водні об'єкти розглядається у дослідженні [39]. Встановлено, що підвищене навантаження на

водні екосистеми під час бойових дій призводить до загострення сезонної динаміки забруднення, а це потребує впровадження адаптивних стратегій моніторингу та захисту водних ресурсів у кризових ситуаціях. У дослідженні [40] здійснено апробацію ентропійно-зваженої оцінки якості води для річки Дніпро, що дозволило виявити істотну різницю між холодним та теплим періодами року. Це підкреслює необхідність врахування сезонних особливостей при розрахунку екологічних індексів. Вплив господарсько-побутових стоків на якість водних ресурсів проаналізовано у роботі [41]. Автор вказує на зростання екологічного ризику в теплий період року, що корелює з підвищеним рівнем евтрофікації та забруднення водних об'єктів. Інтегрована оцінка джерел забруднення Дніпровського водосховища проведена у дослідженні [42]. Виявлено, що основними чинниками погіршення якості води є органічні та азотні сполуки, що вимагає застосування сезонно-зважених стратегій управління якістю води. Оцінка складових екологічної безпеки басейну Сіверського Дінця у роботі [43] підкреслює важливість показників кисневого режиму (вміст розчиненого кисню та біохімічна потреба в кисні) для моніторингу довгострокових змін якості води.

У контексті українських реалій спостерігається відсутність систематизованих досліджень, які об'єднують сезонну динаміку, ентропійне зважування та просторове моделювання. Саме тому розробка таких підходів, що ґрунтуються на нові відкритих даних, є надзвичайно актуальною.

Методи. Для дослідження використовувалися результати державного моніторингу якості поверхневих вод, надані Державним агентством водних ресурсів України. Дані охоплюють понад 540 пунктів спостереження, розташованих у басейнах основних річок України (Дніпро, Дунай, Дністер, Дон, Вісла, Південний Буг, річки Причорномор'я та Приазов'я). У дослідженні було враховано п'ять сезонних періодів: зима, весна, межень, мілководдя та осінь. Оцінка якості поверхневих вод здійснювалась на основі 10 ключових фізико-хімічних показників: рН, вміст розчиненого кисню, біохімічне споживання кисню (БСК₅), хімічне споживання кисню (ХСК), вміст амонійного азоту, нітратів, фосфатів, загального заліза, загальної жорсткості, загальної мінералізації.

Ці параметри було обрано на основі методичних рекомендацій ВООЗ, стандартів ЄС і чинного українського законодавства.

Визначення ентропійно-зваженого індексу здійснюється в декілька етапів [7 – 9]

1. Побудова вихідної матриці проб води і оцінюваних параметрів (1).

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

де x_{ij} - концентрація i -ї речовини для j -го створу, мг/дм³.

2. Побудова нормованої матриці нормованих значення кожного оцінюваного параметра для усунення похибок, викликаних різними одиницями вимірювання.

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{m1} & y_{m2} & \dots & y_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

де y_{ij} – нормоване значення i -ї речовини для j -го створу.

Нормоване значення параметру визначаємо за виразом (3):

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - (x_{ij})_{\min}}{(x_{ij})_{\max} - (x_{ij})_{\min}} \quad (3)$$

Нормоване значення для розчиненого у воді кисню визначаємо за виразом (4):

$$y_{ij} = \frac{(x_{ij})_{\max} - x_{ij}}{(x_{ij})_{\max} - (x_{ij})_{\min}} \quad (4)$$

3. Обчислення інформаційної ентропії (E) кожного параметра за формулою, введеної К.Шенноном (5):

$$E_n = - \left(\frac{1}{\ln n} \right) \sum_{i=1}^m V_{ij} \ln V_{ij} \quad (5)$$

де n – кількість точок відбору проб, а

V_{ij} – ймовірність появи нормалізованого значення (v_{ij}) оцінюваного параметра j у i -й вибірці, що визначається наступним чином:

$$V_{ij} = \frac{v_{ij}}{\sum v_{ij}}. \quad (6)$$

4. Обчислення ентропійних ваг (W), щоб параметрам з нижчою ентропією або мірою безпорядку присвоювалася таким чином більша вага:

$$W_j = (1 - E_j) / \sum_{j=1}^t (1 - E_j). \quad (7)$$

Параметрам, у яких менша ентропія, присвоюється більша вага, оскільки вони вказують на наявність більш структурованої системи, яка є більш організованою і менш випадковою, а тому може бути більш інформативною для оцінки якості води.

5. Агрегація ваг ентропії та шкали оцінки якості в індекс ЕІЗВ виражається наступним чином:

$$EWQI = \sum_{j=1}^n W_j U_j, \quad (8)$$

де EWQI – ентропійнозважений індекс забрудненості води;

U_j для кожного параметра задається як відношення контрольованого значення j -го параметра (I_j) до його стандартного значення (S_j):

$$U_j = \left(\frac{I_j}{S_j} \right). \quad (9)$$

Розраховані значення ЕІЗВ класифікувались за семикласною шкалою:

- I – дуже чиста (ЕІЗВ ≤ 0,3);
- II – чиста (0,3 < ЕІЗВ ≤ 1);
- III – помірно забруднена (1 < ЕІЗВ ≤ 1,5);
- IV – забруднена (1,5 < ЕІЗВ ≤ 2);
- V – брудна (2 < ЕІЗВ ≤ 4);
- VI – дуже брудна (4 < ЕІЗВ ≤ 8);
- VII – надзвичайно брудна (ЕІЗВ > 8).

Для розрахунків у якості нормативного значення було використано показники верхньої межі 2-го класу якості води за ДСТУ 4808:2007. Джерела централізованого питного водопостачання.

Гігієнічні і екологічні вимоги щодо якості води та правил вибирання.

Результати. Річкові басейни, що є джерелом питної води та основою екосистемних послуг, потребують ефективних підходів до управління, спрямованих на забезпечення їхньої екологічної безпеки. Ентропія, яка є мірою невизначеності та хаосу в системі, дозволяє кількісно оцінювати стан річкових басейнів і виявляти фактори, що найбільш впливають на їхню стабільність. Використовуючи методику визначення ентропійно-зваженого індексу стану водного об'єкту було розраховано ентропійно-зважені індекси якості води для кожного пункту моніторингу на основі даних моніторингу поверхневих вод Державного водного агентства України.

Результати аналізу ентропійно-зваженого індексу забрудненості води (ЕІЗВ) за річковими басейнами та сезонами наведено в табл. 1 та на графіках (рис. 1).

Таблиця 1 / Table 1

Розподіл середніх значень ЕІЗВ за басейнами та періодами /
Distribution of average EWQI values by basins and periods

Басейн річки	Весна	Зима	Межень	Мілководдя	Осінь
Вісла	0,74	0,83	0,93	9,89	10,01
Дніпро	0,50	0,41	0,52	4,75	5,16
Дністер	0,80	1,61	1,37	11,35	6,59
Дон	0,68	0,70	0,84	6,93	6,90
Дунай	0,33	0,28	0,48	2,71	6,16
Південний Буг	1,58	2,33	0,59	13,54	11,60
Річки Приазов'я	0,88	0,95	1,17	12,39	11,71
Річки Причорномор'я	0,87	0,83	1,11	8,29	14,23

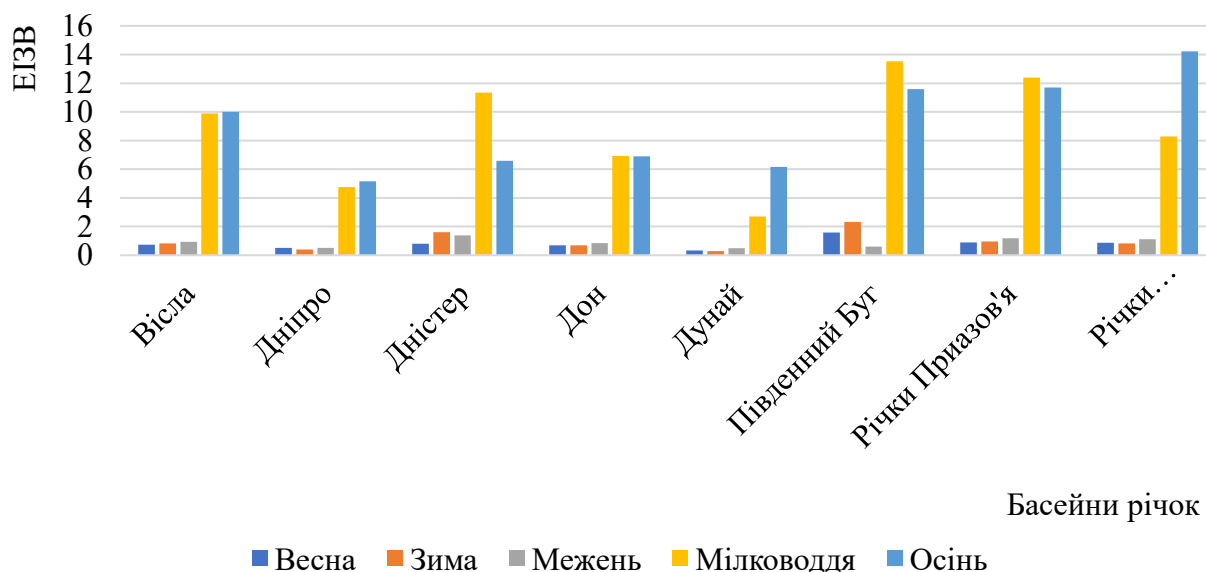


Рис. 1. Розподіл середніх значень ЕІЗВ за басейнами та періодами /
Fig. 1. Distribution of average EWQI values by basins and periods

Для весняного періоду найчистіші води спостерігаються в басейні Дунаю (ЕІЗВ = 0,33; «чиста вода»), а найзабрудненіші – в Південному Бугу (ЕІЗВ = 1,58; «забруднена вода»). Зимового періоду найчистіша вода знову спостерігається у басейні Дунаю (ЕІЗВ = 0,28; «дуже чиста»); Південний Буг демонструє значно вищий рівень забруднення (ЕІЗВ = 2,33; «брудна вода»). Під час межени переважають показники помірного забруднення у більшості басейнів. Найчистіший – Дунай (ЕІЗВ = 0,48; «чиста вода»), а найбрудніший – Дністер (ЕІЗВ = 1,37; «помірно забруднена вода»). Для періоду мілководдя спостерігається найвищий рівень забруднення у всіх басейнах. Наприклад, Південний Буг (ЕІЗВ = 13,54) та річки Приазов'я (ЕІЗВ = 12,39) характеризуються як «надзвичайно брудні». Восени забруднення залишається високим, особливо в басейнах Причорномор'я (ЕІЗВ = 14,23) та Південного Бугу (ЕІЗВ = 11,60), які залишаються у класі «надзвичайно

брудних». Загалом, найнижчі значення ЕІЗВ у весняний та зимовий періоди, а різке підвищення забруднення у період мілководдя, коли концентрація забруднень максимальна через зниження об'ємів води.

Найчистіші річки – Дунай та частково Дніпро, які утримують відносно низькі значення ЕІЗВ навіть у забруднених періодах. Найзабрудненіші – Південний Буг, річки Причорномор'я та Приазов'я в періоди мілководдя й осені. Сезонність відіграє ключову роль у формуванні якості поверхневих вод, зокрема через зміни гідрологічних умов. Найбільше забруднення відзначається в періоди низької водності, що вимагає посиленого моніторингу та впровадження адаптивних заходів управління якістю води, особливо в басейнах Південного Бугу та Причорномор'я. Для візуалізації отриманих даних були створені карти просторового розподілу значень ЕІЗВ (рис. 2 – 6).

На карті просторового розподілу ентропійно-

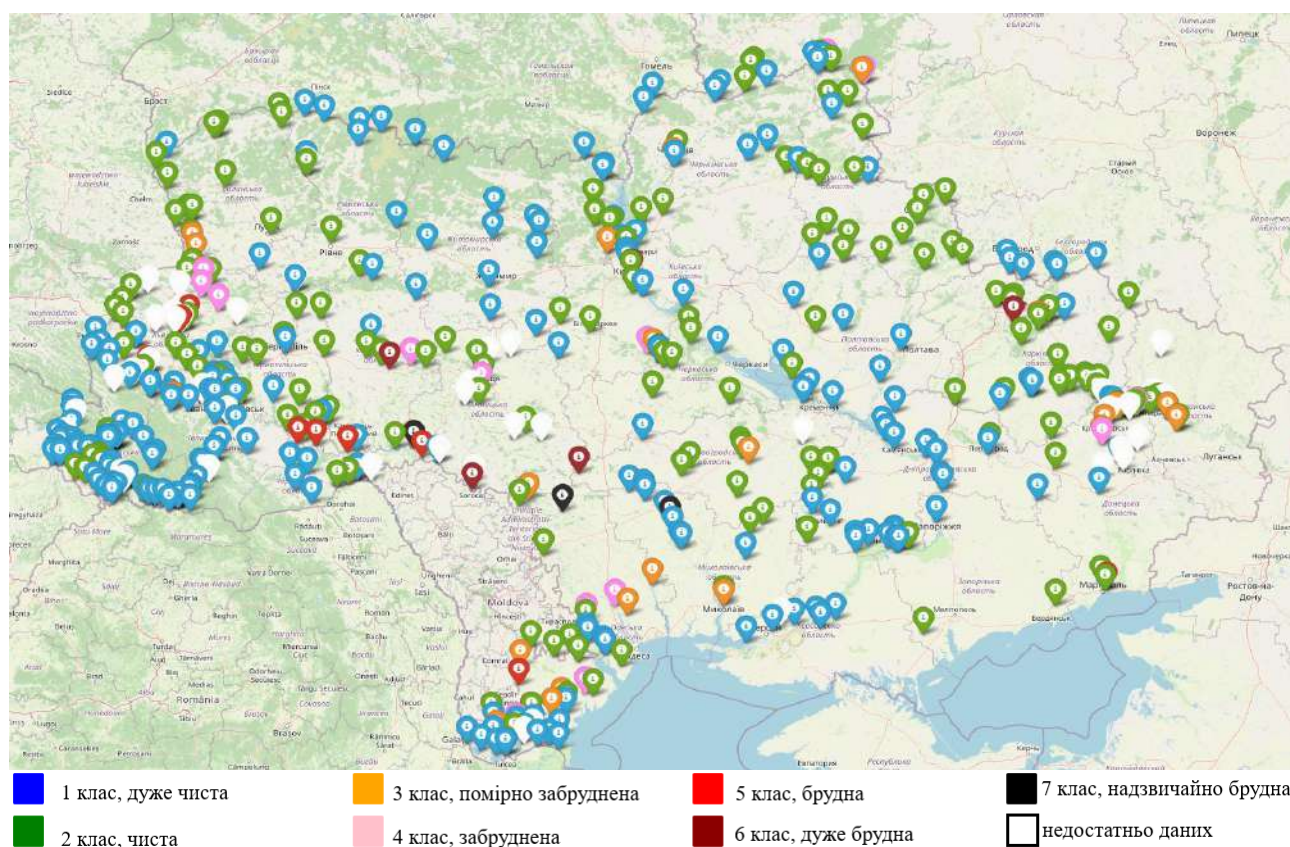


Рис. 2. Просторове розподілення ЕІЗВ для періоду «Зима» /
Fig. 2. Spatial distribution of EWQI for the "Winter" period

зваженого індексу забруднення води (ЕІЗВ) для періоду «зима» (рис. 2) відображено якість води в річкових басейнах України за класифікацією, що охоплює сім рівнів забруднення: від «дуже чиста» (синій колір) до «надзвичайно брудна» (чорний колір). Спостерігається значна варіативність стану води залежно від басейну та географічного положення. До зон з найкращими показниками

відносяться річкові басейни Дунаю демонструють найнижчі значення ЕІЗВ, що вказує на чистоту води (І та ІІ класи), північні регіони України також мають переважно низькі значення ЕІЗВ (І–ІІ класи), що свідчить про відсутність значних антропогенних впливів. До регіонів із середнім рівнем забруднення відносяться Дністер і Дон, переважно відповідають ІІІ–ІV класам якості води

(помірно забруднена та забруднена вода). Найбільш проблемними зонами є басейни Причорномор'я та Приазов'я характеризуються високими показниками ЕІЗВ, які відповідають VI–VII класам (дуже брудна та надзвичайно брудна вода). Показники забруднення також високі в басейні

Південного Бугу, де помітна інтенсивна антропогенна діяльність.

Карта просторового розподілу ЕІЗВ для періоду «Весна» (рис. 3) демонструє відносно кращий стан поверхневих вод у порівнянні з іншими сезонами, що пояснюється підвищеним водозабез-

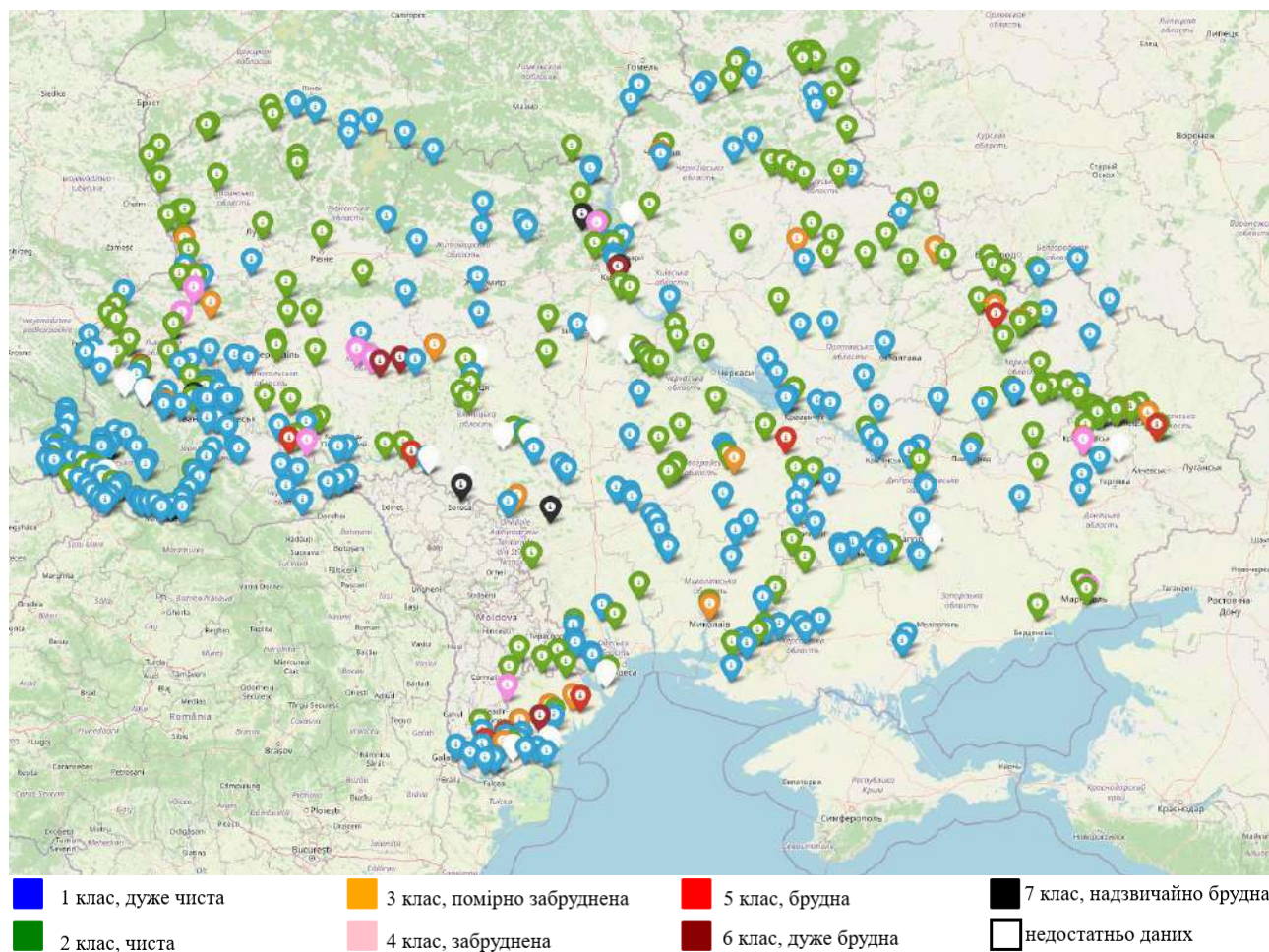


Рис. 3. Просторове розподілення ЕІЗВ для періоду «Весна» /
Fig. 3. Spatial distribution of EWQI for the “Spring” period

печенням через танення снігів і весняні паводки.

Проте якість води варіюється залежно від регіону і басейну. До регіонів з найкращими показниками (I–II класи, дуже чиста та чиста вода) відносяться Дунайський басейн, переважно сині та зелені позначки, що свідчить про дуже чисту та чисту воду, що може бути пов'язано з низьким рівнем індустріалізації та сприятливими природними умовами; басейни західних річок - у басейнах Вісла та Дністер значна кількість пунктів також належить до I та II класів. Регіони із середніми показниками забруднення (III–IV класи, помірно забруднена та забруднена вода) це - центральна частина України. У басейнах Дніпра та Дону спостерігається збільшення кількості жовтих і рожевих маркерів (III і IV класи), що свідчить про локальне антропогенне навантаження, пов'язане із сільським господарством та промисловістю. Річки Причорномор'я та Приазов'я мають кілька

точок з помірним рівнем забруднення.

До зон з високим рівнем забруднення (V–VII класи, брудна, дуже брудна та надзвичайно брудна вода) відносяться басейн Південного Бугу, спостерігаються червоні та чорні маркери, які вказують на значне забруднення води в кількох точках. Це може бути пов'язано з високим рівнем індустріалізації, урбанізації та сільськогосподарського стоку. У деяких точках Приазов'я фіксуються дуже високі значення ЕІЗВ (чорний колір), що свідчить про катастрофічний стан води в окремих місцях. У весняний період якість води в більшості регіонів покращується через розбавлення забруднюючих речовин унаслідок паводків. Це чітко видно у басейнах Дунаю, Вісли та частково Дністра. Найбільш проблемними залишаються басейни Південного Бугу, Причорномор'я та частково Дніпра, де навіть весняні паводки не компенсують вплив антропогенних джерел забруднення.

Карта просторового розподілу ЕІЗВ для періоду «межень» (рис. 4) демонструє специфічні особливості стану якості поверхневих вод у часи найнижчої водності, характерної для цього періоду.

Регіони з найкращими показниками (І–ІІ кла-

си, дуже чиста та чиста вода) це Дунайський басейн, де значна частина точок на карті залишається у синіх і зелених кольорах, що вказує на переважно чистий стан води, що підтверджує стійкість екосистеми навіть за низької водності. Західна Україна (Вісла), подібно до Дунаю, річки

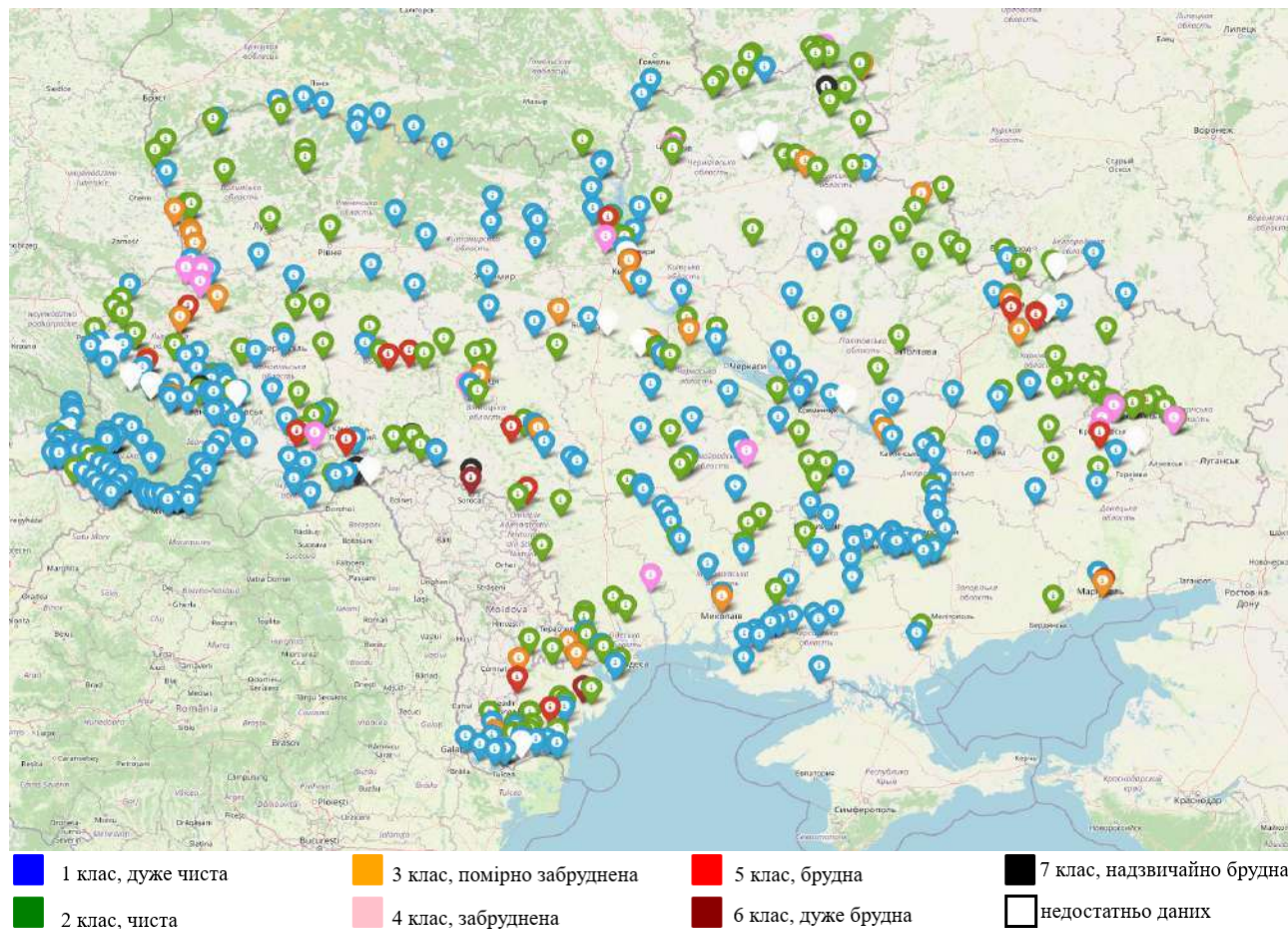


Рис. 4. Просторове розподілення ЕІЗВ для періоду «Межень» /
Fig. 4. Spatial distribution of EQI for the “Low-flow” period

цього регіону здебільшого мають дуже чисту або чисту воду. У північній частині басейну Дніпра фіксується низький рівень забруднення. До регіонів із середніми показниками забруднення (III–IV класи, помірно забруднена та забруднена вода) відноситься Дністер, басейн якого у порівнянні з іншими регіонами демонструє зростання кількості точок жовтого та рожевого кольорів, що свідчить про помірний рівень забруднення. У басейнах Дону і Причорномор'я переважають значення III і IV класів, що відображає наявність антропогенного впливу та концентрацію забруднень через зниження водності. До регіонів з високим рівнем забруднення (V–VII класи, брудна, дуже брудна та надзвичайно брудна вода) входить Південний Буг, де декілька червоних і чорних точок відображають критичний стан води, зумовлений індустріальним і сільськогосподарським впливом; забруднення досягає високих рівнів у деяких точках басейну річок Причорномор'я, що свідчить про

значне антропогенне навантаження на ці екосистеми; в окремих місцях Річок Приазов'я фіксується надзвичайно високий рівень забруднення (VII клас). У період межень якість води в більшості річок погіршується через зменшення водного потоку, що збільшує концентрацію забруднюючих речовин.

Карта просторового розподілу ЕІЗВ (рис. 5) для періоду «мілководдя» демонструє найбільш критичний стан водних ресурсів, що обумовлено мінімальними об'ємами води у річках, які зумовлюють підвищену концентрацію забруднень. Цей період характеризується найвищими рівнями забруднення у багатьох регіонах України. До басейнів з найкращими показниками (I–II класи, дуже чиста та чиста вода) відноситься Дунайський басейн, де у порівнянні з іншими річковими басейнами, зони з синім і зеленим маркерами зберігаються лише в кількох місцях. Це свідчить про відносну стабільність водної екосистеми Дунайсь-

кого басейну навіть у період мілководдя. Частина річок басейну Вісли також демонструє відносно низькі значення забруднення, що пояснюється меншим антропогенним впливом. До регіонів із середніми показниками забруднення (III–IV класи, помірно забруднена та забруднена вода) відноситься Дністер. У басейні цієї річки домінують жовті та рожеві маркери, що свідчить про помірний рівень забруднення. Це може бути резуль-

татом зниження самоочищувальної здатності річки. Показники якості води в частинах басейнів Дніпра та Дону погіршуються, але залишаються у межах III–IV класів.

Регіони з високим рівнем забруднення (V–VII класи, брудна, дуже брудна та надзвичайно брудна вода) відноситься Південний Буг – видно численні червоні, темно-червоні та чорні маркери, що вказують на критично високий рівень за-

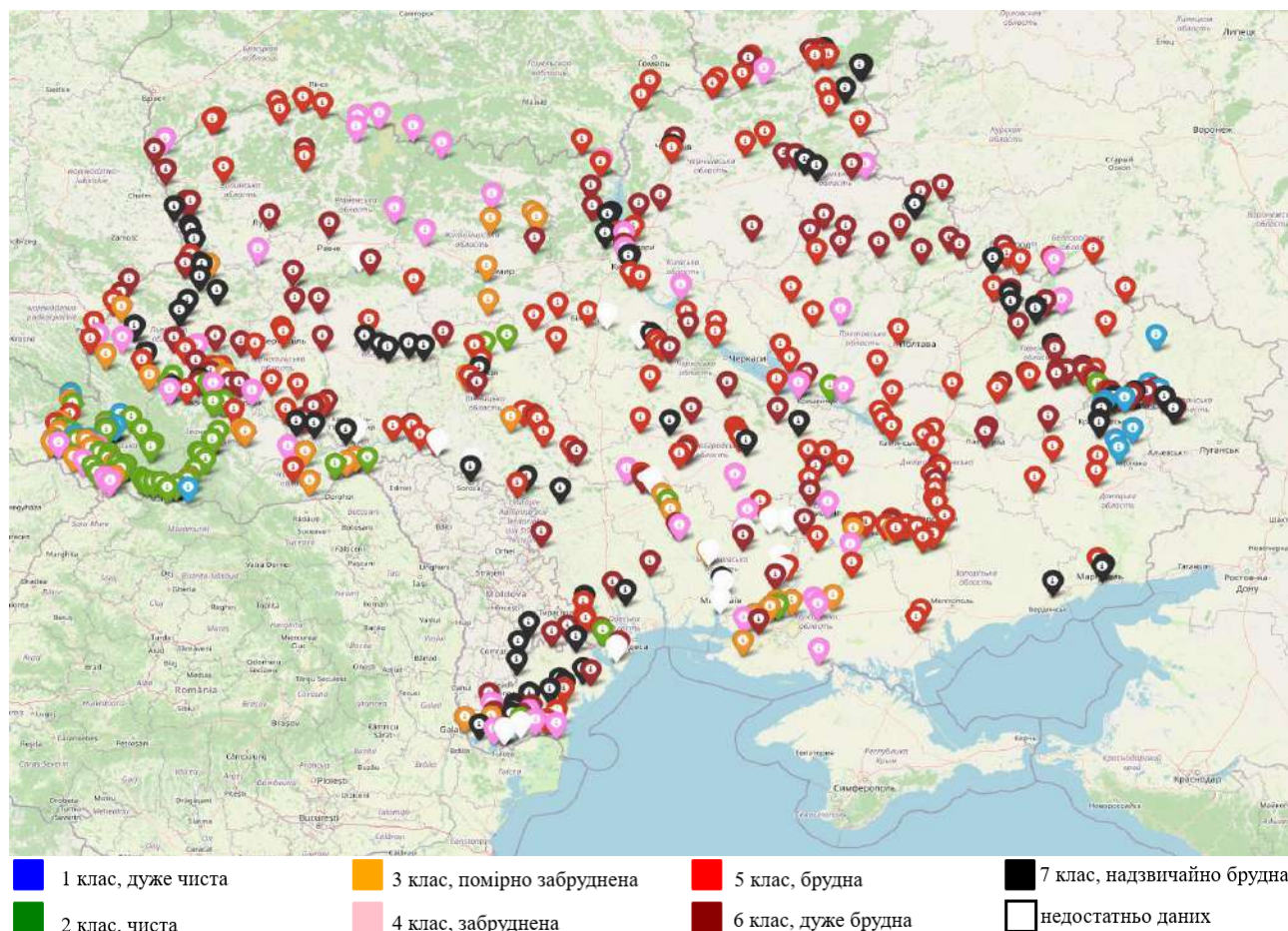


Рис. 5. Просторове розподілення ЕІЗВ для періоду «Мілководдя» /
Fig. 5. Spatial distribution of EWQI for the “Shallow-water” period

бруднення. Основними джерелами проблем є промислові підприємства та аграрні стоки. В басейнах річок Причорномор'я та Приазов'я переважають значення VI–VII класів, що свідчить про катастрофічний стан води. Значна частина басейну Дніпра також відзначається високими значеннями ЕІЗВ, що підтверджує значний вплив антропогенних факторів, таких як промислове забруднення. Через низький рівень води, особливо в малих і середніх річках, в цей період рівень забруднення значно зростає.

Карта просторового розподілу ЕІЗВ для періоду «осінь» (рис. 6) відображає ситуацію із якістю поверхневих вод України наприкінці гідрологічного циклу, коли обсяги річкової водності знижуються після літнього сезону, але досягнення рівнів межени ще не спостерігається. Аналіз свідчить

про наявність значних регіональних контрастів у забрудненні вод, обумовлених як природними, так і антропогенними факторами.

Регіони з найкращими показниками якості води (I–II класи, дуже чиста та чиста вода) це західна частина України (басейни Дунаю та Вісли) – найбільша концентрація синіх і зелених маркерів вказує на високий екологічний стан води. Цей регіон демонструє стабільність якості води завдяки меншим обсягам антропогенного навантаження, ефективності самоочищувальних процесів та сприятливим природним умовам. Локальні чисті зони в центральних та північних частинах басейну Дніпра, ці річкові ділянки зберігають відносно низькі показники забруднення. Регіони із середніми рівнями забруднення (III–IV класи, помірно забруднена та забруднена вода) це басейни

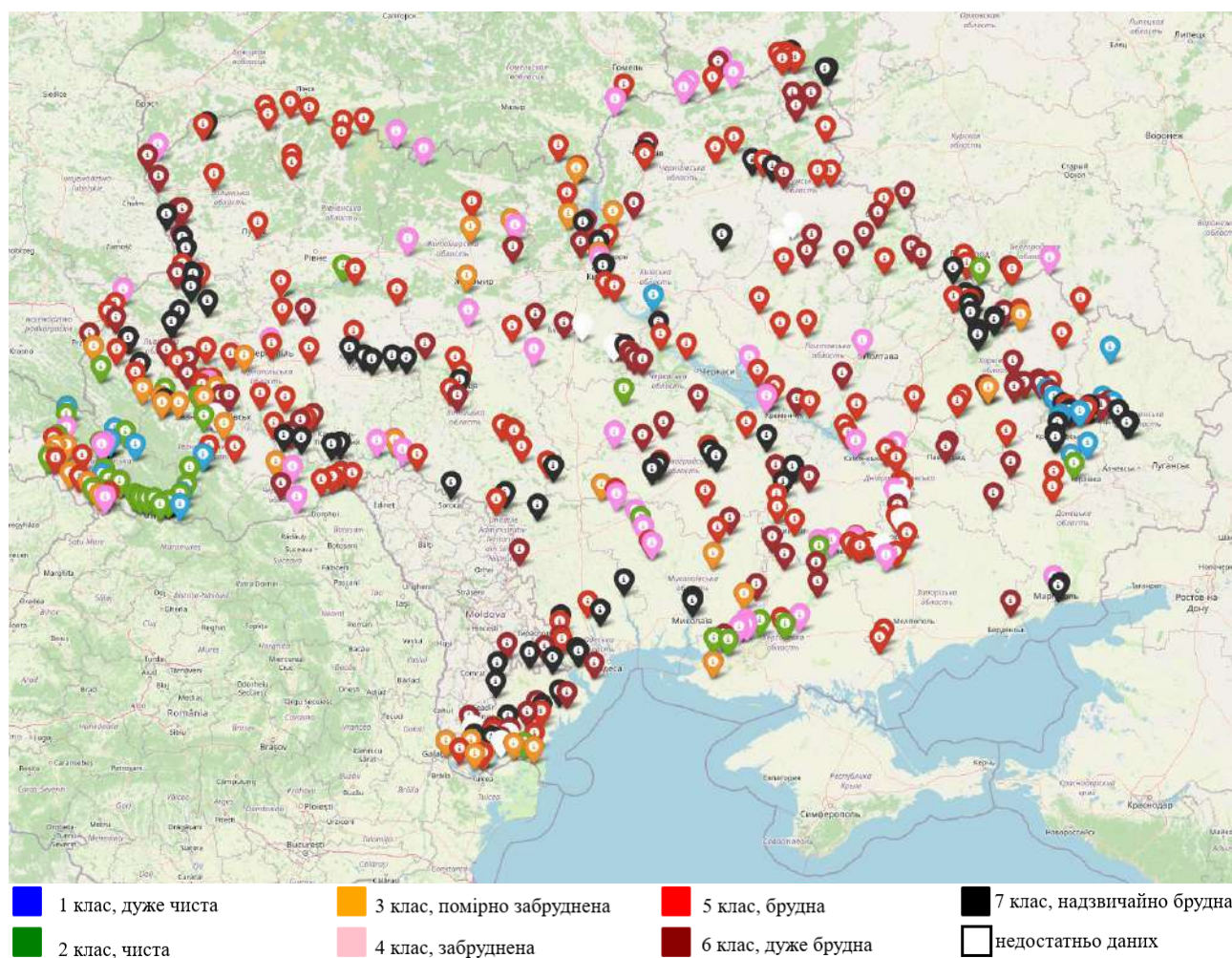


Рис. 6. Просторове розподілення ЕІЗВ для періоду «Осінь» /
Fig. 6. Spatial distribution of EWQI for the “Autumn” period

Дністра та Дніпра, де значна кількість жовтих і рожевих маркерів свідчить про середній рівень забруднення води. Помірний екологічний стан цих зон обумовлений як природними умовами, так і локальними впливами сільського господарства та недостатньо очищених стічних вод. Частина річок Причорномор'я та Приазов'я, де також спостерігається помірне забруднення, що характерне для зони інтенсивного аграрного виробництва. Регіони з критичними показниками якості води (V–VII класи, брудна, дуже брудна та надзвичайно брудна вода) це басейн Південного Бугу. На карті домінують червоні, темно-червоні та чорні маркери, які вказують на високі концентрації забруднюючих речовин. Цей басейн є одним із найбільш вразливих через значне індустріальне навантаження. Басейни Причорномор'я та Приазов'я, де видно значну кількість зон із дуже брудною та надзвичайно брудною водою, зумовлена високим рівнем аграрного забруднення, інтенсивним використанням добрив та недосконалими системами очищення стічних вод. У східній частині України (басейни Дону та східної частини Дніпра) фіксуються численні ділянки із забруд-

ненням у класах VI–VII, що може бути пов'язано з промисловим впливом та високою концентрацією точкових джерел забруднення. Осінній період демонструє початкові ознаки накопичення забруднюючих речовин, які стають більш вираженими у зимовий та межений періоди.

Дискусія. Загалом, аналіз просторового розподілу ЕІЗВ (рис. 2 – 6) дозволяє виявити певні закономірності сезонної та регіональної варіативності. Для періоду зими карта ЕІЗВ демонструють найкращий екологічний стан у більшості басейнів України. Обидва індекси фіксують відносно низькі рівні забруднення, особливо у річках західного регіону (Дунай, Вісла) та частково в басейнах Дніпра. Весняні карти ЕІЗВ показують покращення якості води завдяки збільшенню водності та розведенню забруднюючих речовин. У басейнах Дунаю та Вісли переважають I–II класи якості води. У період межені, низької водності показники забруднення зростають. ЕІЗВ краще диференціює забруднення в окремих річках, демонструючи вищу чутливість до концентрації забруднюючих речовин. Найгірші показники фіксуються в період мілководдя. ЕІЗВ показує більш детальну

просторову варіативність у забрудненні, особливо в басейнах Південного Бугу, Причорномор'я та Приазов'я, де спостерігаються значення VI–VII класів. Восени забруднення залишається високим, проте не досягає пікових значень, характерних для мілководдя. Карти ЕІЗВ для цього періоду демонструють схожі тенденції. Найкращий стан води (I–II класи) спостерігається у західних регіонах (басейни Дунаю та Вісли), де фіксується менший антропогенний вплив. Найбільш проблемні зони – басейни Південного Бугу, Причорномор'я та Приазов'я, які в усі сезони демонструють найвищі значення індексів забруднення. ЕІЗВ є більш чутливим індикатором, оскільки враховує ваговий внесок різних параметрів у загальний рівень забруднення.

На основі аналізу максимальних значень ЕІЗВ для кожного річкового басейну та сезону можна виділити наступні тенденції та найбільш забруднені пости (табл. Е.1). Для басейну Вісли максимальне забруднення в осінь (41.49) і мілководдя (24.98); для Дніпра пікові значення забруднення в мілководдя (75.68) та осінь (58.27); для Дністра високі рівні забруднення в мілководдя (167.57) та зима (66.66); для Дону максимальне забруднення в мілководдя (49.13) та осінь (34.52). для Дунаю екстремально високе забруднення в осінь (331.45) та мілководдя (49.48); басейн Південного Бугу характеризується високими рівнями забруднення в мілководдя (327.24) та навесні (41.69); річки Приазов'я мають максимальне забруднення в мілководдя (33.35) та восени (34.70); річки Причорномор'я найбільше забруднені восени (94.11) та в мілководдя (30.12).

З таблиці видно, що найвищі значення ЕІЗВ спостерігаються у період мілководдя та осені через зниження водності, що сприяє концентрації забруднень. Найбільш забрудненими є басейни Дністра, Південного Бугу та Дунаю. Найвищі значення ЕІЗВ фіксуються у точках із безпосереднім впливом промислових та сільськогосподарських стоків. Окремі пости спостереження з найвищими рівнями ЕІЗВ вимагають додаткової уваги та можливо подальших заходів для зменшення забруднення.

У зимовий період максимальні значення ЕІЗВ спостерігаються у басейнах Південного Бугу (31,67), Дністра (66,66) та Дніпра (6,29). Найвищі показники характерні для водойм, розташованих поблизу великих промислових і сільськогосподарських об'єктів (наприклад, Ташлицьке водосховище та скидний канал БСА). Найвищі значення ЕІЗВ досягли 7 класу (надзвичайно брудна вода). Забруднення у басейні Дністра є найбільш критичним через скиди поблизу ГЕС та очисних споруд. У весняний період спостерігається зростання ЕІЗВ, пов'язане з підвищенням

концентрації забруднюючих речовин, що потрапляють у річки під час весняного водопілля. Найвищі показники спостерігаються у басейнах Південного Бугу (41,69), Дністра (12,58) та Дніпра (8,51). Значна частина проблемних ділянок знаходиться поблизу промислових регіонів або в місцях скиду стічних вод (наприклад, Домбровський кар'єр у басейні Дністра). У період межені низької водності значення ЕІЗВ зростають через зменшення розведення забруднень у водних об'єктах. Критичними є басейни Дністра (34,21) та Дунаю (24,48), які страждають від впливу великих промислових об'єктів (наприклад, Домбровський кар'єр, скиди у межах Чернівців). Для Дніпра (22,51) і Південного Бугу (13,43) також характерне високе забруднення, зокрема через скиди стічних вод та вплив гідротехнічних споруд. У період мілководдя спостерігається найгірший екологічний стан, що пояснюється найнижчим рівнем водності, який ускладнює самоочищення річок. Максимальні значення ЕІЗВ зафіксовані у басейнах Дністра (167,57), Дніпра (75,67) та Південного Бугу (327,23), що є критичними. Локалізовані джерела забруднення, зокрема скидні канали промислових підприємств і неочищені стоки, відіграють ключову роль. Восени значення ЕІЗВ залишаються високими, особливо в басейнах Південного Бугу (65,03), Дністра (64,13) та Дніпра (58,26). Найвищі показники у Південному Бугу пояснюються впливом Миколаївської ТЕЦ та інших техногенних об'єктів. У Дністрі та Дніпрі значний вплив мають скиди з очисних споруд та промислових зон.

Відповідно до ранжування можна виділити ключові проблемні басейни. Південний Буг з найвищими значеннями ЕІЗВ протягом усього року. Проблемні ділянки включають Миколаївський Бузький лиман, Ташлицьке водосховище та інші райони скидів стічних вод. Значення ЕІЗВ досягають 7 класу в усі сезони, особливо у мілководдя (327,23) та осінь (65,03). Для басейну р. Дністер характерний високий рівень забруднення, особливо у зонах впливу очисних споруд і промислових скидів. Критичні значення зафіксовані у періоди межені (34,21) та мілководдя (167,57). На Дніпрі значний вплив мають скидні канали (наприклад, БСА), технічні водозабори та скиди зворотних вод. У мілководдя та осінь рівень забруднення досягає критичних значень (75,67 і 58,26 відповідно). На Дунаї забруднення спостерігається переважно у межень та мілководдя, де значення досягають 24,48 (оз. Катлабух).

Динаміка ЕІЗВ та відповідних класів води для розглянутих раніше річок Південний Буг, Дністер та Сіверський Донець наведена на графіках (рис. 7 – 12).

Для р. Південний Буг (рис. 7 – 8) значення

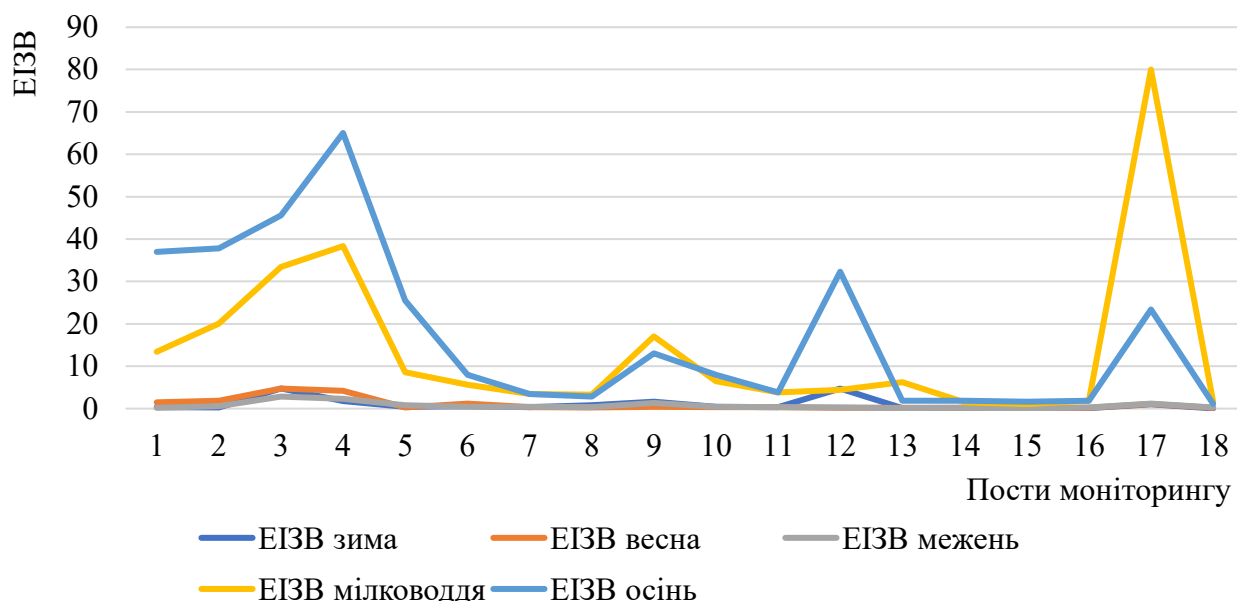


Рис. 7. Динаміка ЕІЗВ за постами моніторингу для річки Південний Буг /
Fig. 7. EWQI dynamics by monitoring stations for the Southern Bug River

ЕІЗВ вказують на змінність якості води протягом різних пор року, з найнижчими середніми значеннями в межень (0.684) та найвищими в осінь (17.443). Стандартне відхилення показує значну варіативність індексу якості води, особливо під час мілководдя та в осінній період, що свідчить про значні відмінності між точками вимірювання.

Під час зими та весни спостерігається більш висока частка вимірювань, що належать до кращих класів води (1 та 2 класи). У період межень та мілководдя спостерігається зміщення розподілу в бік гірших класів води, з особливо високою часткою вимірювань, що належать до 7 класу води під час мілководдя.

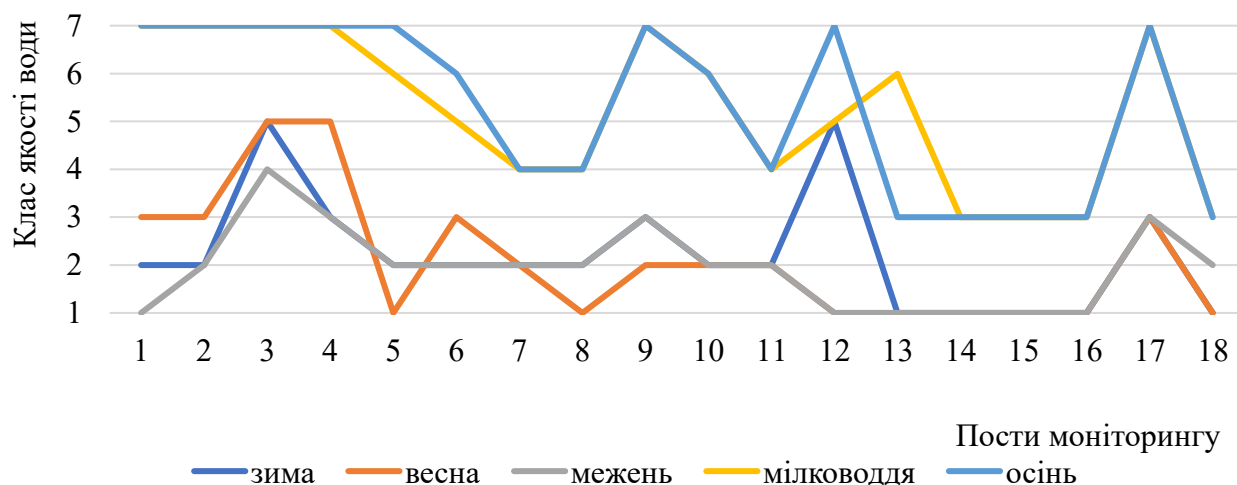


Рис. 8. Динаміка значень класу якості води за постами моніторингу для річки Південний Буг /
Fig. 8. Dynamics of water quality class values by monitoring stations for the Southern Bug River

Осінь характеризується високими значеннями ІЗВ, з більшістю вимірювань, що попадають в 6 та 7 класи води і вказує на значне погіршення якості води. Дані вказують на те, що якість води в річці Південний Буг зазнає значних змін протягом року, з особливим погіршенням під час осіннього періоду, обумовленими сезонними впливами, стоком та аграрною діяльністю.

Значення ЕІЗВ для р. Дністер (рис. 9) свід-

чать про зміну якості води в різні періоди року, з найвищим значенням в зимовий період (4.233). Стандартне відхилення демонструє велику варіативність індексу якості води, особливо в зимовий період, що вказує на значні відмінності в якості води між різними точками вимірювання.

Впродовж зими та весни більшість вимірювань належать до кращих класів води (1 та 2 класи), з найбільшою часткою вимірювань, що

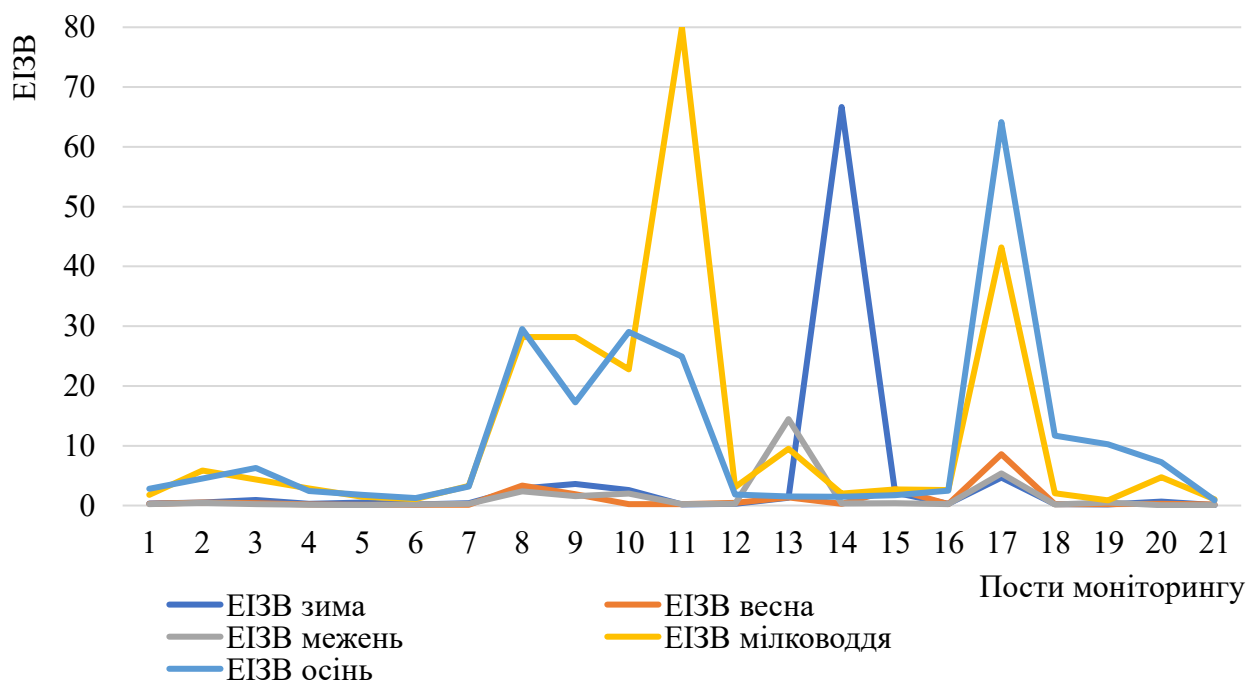


Рис. 9. Динаміка ЕІЗВ за постами моніторингу для річки Дністер /
Fig. 9. EWQI dynamics by monitoring stations for the Dniester River

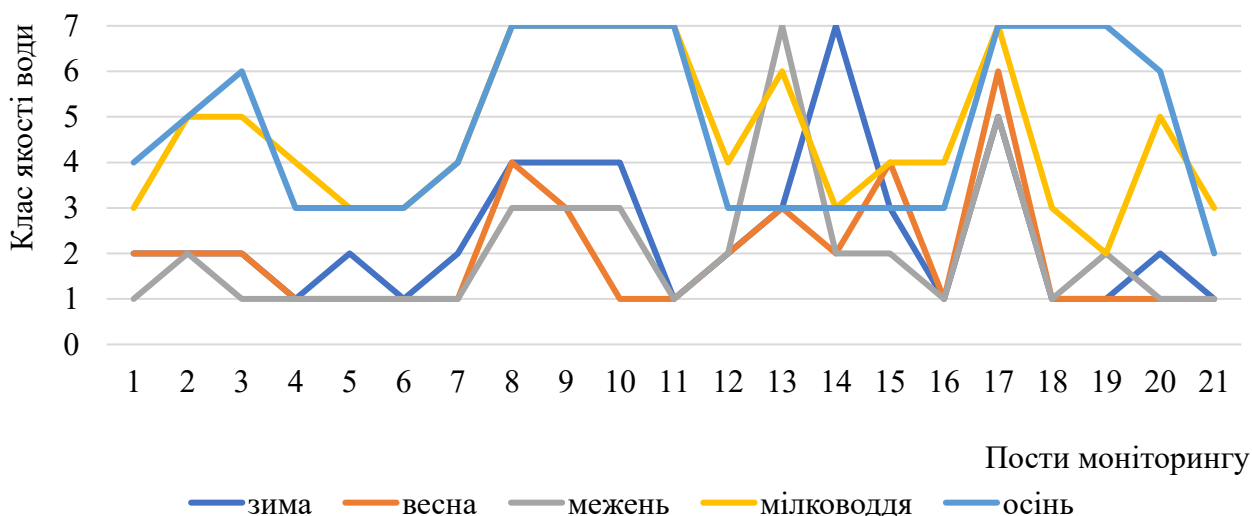


Рис. 10. Динаміка значень класу якості води за постами моніторингу для річки Дністер /
Fig. 10. Dynamics of water quality class values by monitoring stations for the Dniester River

попадають в 1 клас (рис. 10). У період мілководдя та осені спостерігається збільшення частки вимірювань, що належать до гірших класів води (3 клас та вище), з високою часткою вимірювань, що попадають в 3 та 7 класи. Результати свідчать, що річка Дністер також зазнає сезонних змін в якості води, з погіршенням якості під час мілководдя та осіннього періоду. Варто зазначити значну варіативність якості води саме в зимовий період, що пов'язано з особливостями гідрологічного режиму річки та впливом антропогенних факторів.

Середні значення ЕІЗВ для річки Сіверський Донець показують (рис. 11), що найвища середня

якість води спостерігається в зимовий період (0.446) та весною (0.498), з поступовим зниженням в літні місяці (межень - 0.647) та значним погіршенням під час мілководдя (5.940) та осені (6.266). Стандартне відхилення вказує на відносну однорідність якості води в зимовий період та весною, але з більшою варіативністю під час мілководдя та осені.

У зимовий період та весну більшість вимірювань належать до 2 класу, що свідчить про досить високу якість води (рис. 12). Під час мілководдя та осені спостерігається значне погіршення якості води, з більшістю вимірювань, що попадають до

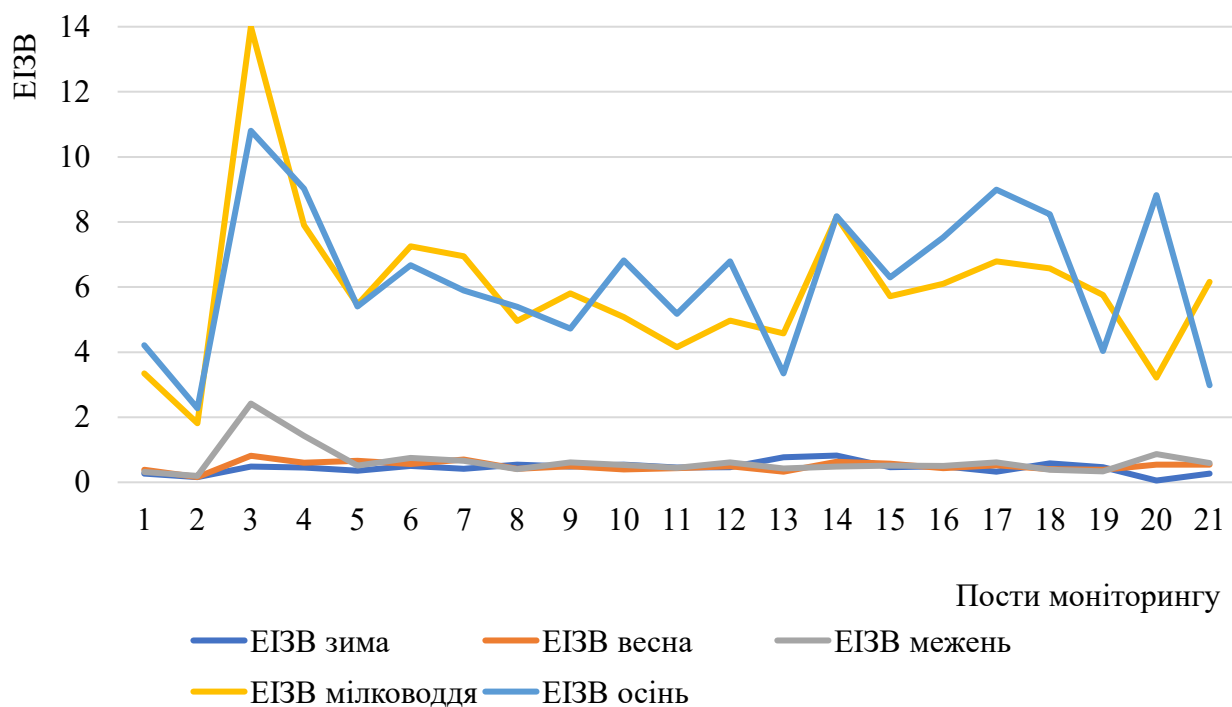


Рис. 11. Динаміка ЕІЗВ за постами моніторингу для річки Сіверський Донець /
Fig. 11. EWQI dynamics by monitoring stations for the Siverskyi Donets River

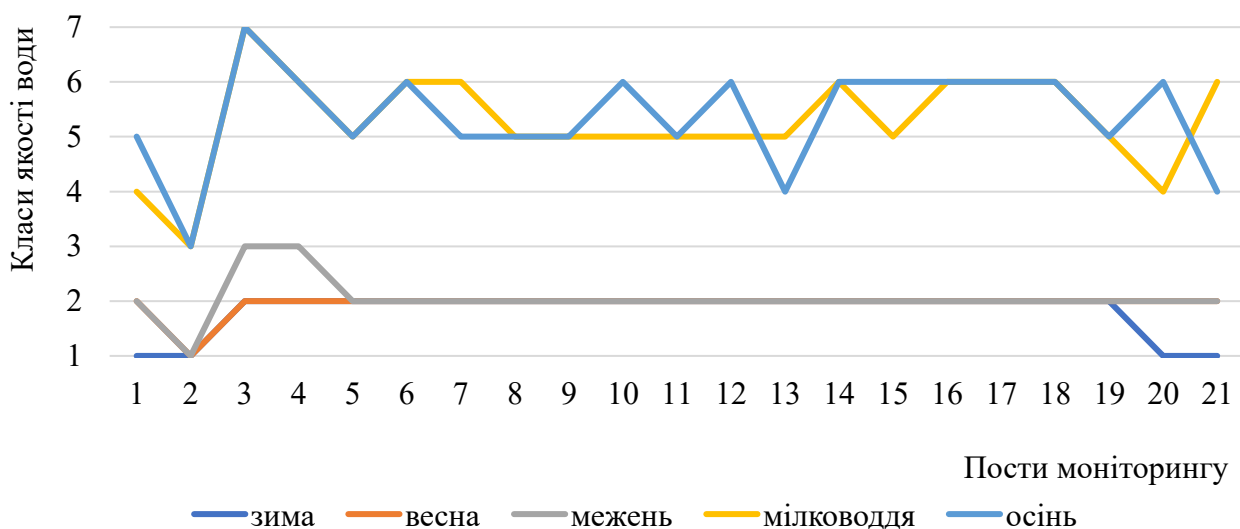


Рис. 12. Динаміка значень класу якості води за постами моніторингу для річки Сіверський Донець /
Fig. 12. Dynamics of water quality class values by monitoring stations for the Siverskyi Donets River

5 та 6 класів.

Результати свідчать про значне сезонне коливання якості води в річці з кращою якістю в холодніші місяці (зима, весна) та погіршенням під час тепліших періодів (мілководдя, осінь). Особливо критичними є періоди мілководдя та осені, коли якість води значно погіршується, що пов'язано з низьким рівнем води, підвищенням температури та антропогенним впливом.

Висновки. Досліджено динаміку ентропійно-зваженого показника забрудненості води для річкових басейнів. Середнє значення ЕІЗВ для весни становить 0.65, що є найнижчим серед

усіх періодів, вказуючи на вищу якість води. Взимку середнє значення зростає до 0.77, що може свідчити про невелике зниження якості води порівняно з весною. В період межені середнє значення ЕІЗВ дещо знижується до 0.71, що все ще вказує на добру якість води. Для мілководдя спостерігається різке збільшення середнього значення до 6.69, що свідчить про значне погіршення якості води. Восени середнє значення зберігається високим і становить 6.89, підтримуючи тенденцію погіршення якості води, зафіксовану в мілководді. Найкращий стан води фіксується у зимовий та весняний періоди, тоді як найбільші

проблеми виникають у період мілководдя. Південний Буг, Причорномор'я та Приазов'я залишаються зонами найбільшого ризику забруднення, що вимагає пріоритетних заходів з моніторингу та покращення якості води. ЕІЗВ забезпечує

більш точний аналіз просторово-часових змін у якості води, є ефективнішим індикатором завдяки своїй чутливості та здатності враховувати багатofакторний вплив.

Список використаних джерел

1. Mahato, M.K., Singh, G., Singh, P.K., Singh, A.K., & Tiwari, A.K. (2017). Assessment of mine water quality using heavy metal pollution index in a coal mining area of Damodar River Basin, India. *Bull Environ Contam Toxicol*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00128-017-2097-3>
2. Pandey, H.K., Tiwari, V., Kumar, S., Yadav, A., & Srivastava, S.K. (2020). Groundwater quality assessment of Allahabad smart city using GIS and water quality index. *Sustain Water Resour Manag*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40899-020-00375-x>
3. Sajil Kumar, P.J., & James, E.J. (2013). Development of Water Quality Index (WQI) model for the groundwater in Tirupur district, South India. *Chin J Geochem* 32:261–268. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11631-013-0631-5>
4. Shweta, T., Bhavtosh, S., Prashant, S., & Rajendra, D. (2013). Water quality assessment in terms of water quality index. *Am J Resour*. DOI: <https://doi.org/10.12691/ajwr-1-3-3>
5. Sutadian, A.D., Muttill, N., Yilmaz, A.G., & Perera, B.J.C. (2018) Development of a water quality index for rivers in West Java Province, Indonesia. *Ecol Indic*, 85:966–982 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.11.049>
6. Sutadian, A.D., Muttill, N., Yilmaz, A.G., & Perera, B.J.C. (2016). Development of river water quality indices – a review. *Environ Monit Assess*, 188(1):58 DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-015-5050-0>
7. Amiri, V., Rezaei, M., & Sohrabi, N. (2014). Groundwater quality assessment using entropy weighted water quality index (EWQI) in Lenjanat. *Iran Environ Earth Sci*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3255-0>
8. Mrunmayee, M., Sahoo, K.C., Patra, J.B., Swain & K.K. Khatua (2017) Evaluation of water quality with application of Bayes' rule and entropy weight method, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 21:6, 730-752, DOI: <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1150895>
9. Singh, K.R., Goswami, A.P., Kalamdhad, A.S., & Kumar, B. (2019) Development of irrigation water quality index incorporating information entropy. *Environ Dev Sustain* 22:3119–3132. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00338-z>
10. Muangthong, S., & Shrestha, S. (2015). Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: case study of the Nampong River and Songkhram River, Thailand. *Environ Monit Assess*, 187(9):548. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4774-1>
11. Kadam, A.K., Wagh, V.M., Muley, A.A., Umrikar, B.N., & Sankhua, R.N. (2019). Prediction of water quality index using artificial neural network and multiple linear regression modelling approach in Shivganga River basin, India. *Model Earth Syst Environ* 5:951–962. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00581-3>
12. Li, P., Qian, H., & Wu, J. (2010). Groundwater quality assessment based on improved water quality index in Pengyang County, Ningxia, Northwest China. *J Chem*, 7(S1): S209–S216. DOI: <https://doi.org/10.1155/2010/451304>
13. Ashby, W. (1959). *Introduction to cybernetics*. M.: IL. 432 p. DOI: <https://doi.org/10.1080/00048405785200161>
14. Amiri, V., Rezaei, M., & Sohrabi, N. (2014). Groundwater quality assessment using entropy weighted water quality index (EWQI) in Lenjanat, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 72(9), 3479–3490. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3255-0>
15. Subba Rao, N., Sunitha, B., Adimalla, N., & Chaudhary, M. (2020). Quality criteria for groundwater use in Telangana state, India, through ISD, EWQI and PCA. *Environmental Geochemistry and Health*, 42(2), 579–599. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00393-5>
16. Abdus-Salam, M.O., Akinsanya, Y.O., Salami, I.O. et al. (2024). Entropy-weighted water quality index assessment of groundwater in Ibadan metropolis, Southwestern Nigeria. *Discov Water* 4, 121. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43832-024-00157-y>
17. Mashala, M. J., Dube, T., & Ayisi, K. K. (2025). Seasonal and Spatial Dynamics of Surface Water Resources in the Tropical Semi-Arid Area of the Letaba Catchment: Insights from Google Earth Engine, Landscape Metrics, and Sentinel-2 Imagery. *Hydrology*, 12(4), 68. DOI: <https://doi.org/10.3390/hydrology12040068>
18. Li, P., Karunanidhi, D., Subramani, T. et al. (2021). Sources and Consequences of Groundwater Contamination. *Arch Environ Contam Toxicol* 80, 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00244-020-00805-z>
19. Gorgij, A.D., Kisi, O., Moghaddam, A.A. et al. (2017). Groundwater quality ranking for drinking purposes, using the entropy method and the spatial autocorrelation index. *Environ Earth Sci* 76, 269 DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6589-6>
20. Islam, A. R. M. T., Mamun, A. A., Rahman, M. M., & Zahid, A. (2020). Simultaneous comparison of modified-integrated water quality and entropy weighted indices: Implication for safe drinking water in the coastal region of Bangladesh. *Ecological Indicators*, 113, 106229. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106229>
21. 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>
22. Egbueri, J. C., Ameh, P. D., & Unigwe, C. O. (2020). Integrating entropy-weighted water quality index and multiple pollution indices towards a better understanding of drinking water quality in Ojoto area, SE Nigeria. *Scientific African*, 10, e00644. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00644>

23. Adimalla, N., Li, P. & Venkatayogi, S. (2018). Hydrogeochemical Evaluation of Groundwater Quality for Drinking and Irrigation Purposes and Integrated Interpretation with Water Quality Index Studies. *Environ. Process.* 5, 363–383. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40710-018-0297-4>
24. Ganiyu, S.A., Oyadeyi, A.T., Rabi, J.A. et al. (2022). Hydrogeochemical categorization and quality assessment of shallow groundwater sources in typical urban slum and peri-urban areas of Ibadan, Southwest Nigeria. *Environ Earth Sci* 81, 111. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10237-8>
25. Oyelakin, J.F., Ahmad, S.M., Aiyelokun, O.O. et al. (2021). Water quality assessment of groundwater in selected potable water sources for household use in Ibadan, Southwest, Nigeria. *Int J Energ Water Res* 5, 125–132. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42108-020-00090-5>
26. 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. DOI: <https://doi.org/10.4236/ojms.2021.113008>
27. 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. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96633-9>
28. 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. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-77534-z>
29. 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>
30. Piddubna, L., Dybach, I., Krasovskiy, V., Pliekhanov, K., Mogylevskiy, R. (2024). Analysis of the impact of digital development on a country's economic growth. *Economic Development*, 23, 38–46. DOI: <https://doi.org/10.57111/econ/2.2024.38>
31. Teslenko, A., Chernukha, A., Bezuglov, O., Bogatov, O., Kunitsa, E., Kalyna, V., Katunin, A., Kobzin, V., Minka, S. (2019). Construction of an algorithm for building regions of questionable decisions for devices containing gases in a linear multidimensional space of hazardous factors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5, 42–54. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.181668>
32. Malyarets, L., Iastremska, O., Barannik, I., Larina, K. (2024). Assessment of structural changes in stable development of the country. *Economic Development*, 23, 8–16. DOI: <https://doi.org/10.57111/econ/2.2024.08>
33. Gavkalova, N., Kyrychenko, Y. (2023). Scientific-theoretical basis of the territorial development strategy. *Economic Development*, 22, 31–37. DOI: <https://doi.org/10.57111/econ/1.2023.31>
34. Guryanova, L., Yatsenko, R., Dubrovina, N., Babenko, V., Gvozdzitskiy, V. (2021). Machine learning methods and models, predictive analytics and applications: Development trends in the post-crisis syndrome caused by COVID-19. *Proceedings of MPSESM-XIII Conference*. <https://ceur-ws.org/Vol-2649/paper1.pdf>
35. Bezsonnyi, V., Plyatsuk, L., Ponomarenko, R., Asotskiy, V., Tretyakov, O., Zhuravskij, 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. DOI: <https://doi.org/10.15421/112341>
36. Bezsonnyi, V., Nekos, A. (2022). Modeling of the oxygen regime of the Chervonooskilsky reservoir. *Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Monitoring 2022*. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580216>
37. Bezsonnyi, V., Tretyakov, O., Sherstyuk, M., Nekos, A. (2022). Thermodynamic aspects of the systems approach in ecology. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series 'Geology. Geography. Ecology'*, (57), 268–281. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-20>
38. 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. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-23>
39. Bezsonnyi, V., Nekos, A. (2023). Analysis of the environmental risk of water bodies in conditions of military danger. *Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Monitoring 2023*. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520153>
40. Bezsonnyi, V., Plyatsuk, L., Ponomarenko, R., Tretyakov, O. (2023). Assessment of ecological safety of a surface water object. *Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Monitoring 2023*. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520155>
41. Bezsonnyi, V. (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*. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580218>
42. Bezsonnyi, V., Plyatsuk, L., Zhuravskij, M., Tretyakov, O., Ponomarenko, R. (2023). Integrated assessment of the Dnipro Reservoir pollution sources. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 32(3), 461–473. DOI: <https://doi.org/10.15421/112341>
43. Bezsonnyi, V., Ponomarenko, R., Tretyakov, O., Asotskiy, V., & Kalynovskiy, A. (2021). Regarding the choice of composite indicators of ecological safety of water in the basin of the Siverskyi Donets. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 30(4), 622–631. DOI: <https://doi.org/10.15421/112157>

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Seasonal and spatial dynamics of entropy-weighted water quality assessment in surface waters of Ukraine

Vitalii Bezsonnyi¹

PhD (Technical), Associate Professor,

Department of Hotel, Restaurant Business and Craft Technologies,

¹ Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, Ukraine;

Oleg Tretyakov²

DSc (Technical), Professor,

Department of Civil and Industrial Safety named after Hero of Ukraine Chub O.S.,

² Kyiv Aviation Institute, Kyiv, Ukraine;

Leonid Plyatsuk³

DSc (Technical), Professor,

Head of the Department of Ecology and Environmental Protection Technologies,

³ Sumy State University, Sumy, Ukraine;

Roman Ponomarenko⁴

DSc (Technical), Professor,

Acting Head of the Research Institute for Civil Protection,

⁴ National University of Civil Protection of Ukraine, Kyiv, Ukraine;

Oksana Davydova¹

DSc (Economics), Professor,

Head of the Department of Hotel, Restaurant Business and Craft Technologies

ABSTRACT

Introduction. Ensuring the ecological safety of river basins is one of the most urgent environmental challenges in the context of achieving the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), particularly SDG 6 (Clean Water and Sanitation) and SDG 12 (Responsible Consumption and Production). Surface water quality is a critical component of regional environmental stability and sustainable development. However, increasing anthropogenic pressure and climate change are destabilizing natural aquatic ecosystems and complicating the functioning of water supply systems. According to international data, over 40% of the global population faces water scarcity.

This study aims to assess the seasonal and spatial variability in the quality of surface waters in Ukraine using an entropy-weighted water quality index (EWQI). The object of the research is the system of surface water bodies of Ukraine, while the subject is the seasonal and spatial variation in their ecological status based on physical and chemical indicators.

Methods. The study utilized open-access data from Ukraine's state environmental monitoring system, covering over 540 monitoring points across major river basins: the Dnipro, Dniester, Danube, Don, Vistula, Southern Bug, Azov Sea rivers, and the Black Sea coastal basins. Water quality data were analyzed for five seasonal periods: winter, spring, low-flow, shallow-water, and autumn. Ten key hydrochemical parameters were selected for analysis, including dissolved oxygen, biological oxygen demand, chemical oxygen demand, ammonium nitrogen, nitrates, phosphates, total hardness, and total dissolved solids.

The EWQI was calculated by normalizing each parameter and assigning it a weight based on its Shannon entropy. The greater the variability of a parameter, the higher its informational contribution. The final index was classified according to a seven-class scale, from "very clean" to "extremely polluted". Spatial analysis and visualizations were carried out using QGIS.

Results. The entropy-weighted assessment revealed clear seasonal and regional trends in surface water quality. The best water quality was recorded during the winter and spring periods, while the highest levels of pollution occurred in shallow-water and autumn seasons. This dynamic is attributed to temperature fluctuations, reduced dilution capacity during low flows, and agricultural runoff during warm periods. Spatially, the most polluted regions were identified in the basins of the Southern Bug, Azov Sea rivers, and the Black Sea littoral, where anthropogenic pressures are particularly high. EWQI values also indicated that certain tributaries and local watercourses demonstrated extreme sensitivity to seasonal factors. The integration of entropy-based weights enhanced the sensitivity of the water quality index to both spatial variability and seasonal trends, providing a more differentiated ecological picture than conventional methods.

Conclusions. The entropy-weighted water quality index provides a robust, objective, and adaptable tool for assessing the ecological status of surface waters. The method successfully captures seasonal and spatial variability, highlighting critical regions and periods that require intensified environmental monitoring and remediation measures. The research findings can serve as a scientific basis for updating national water monitoring programs and aligning with international environmental standards.

Keywords: *entropy-weighted water quality index (EWQI); surface water; ecological monitoring; seasonal variation; spatial analysis.*

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 1 April 2025

Accepted 2 May 2025

Impact of peat extraction from the peatlands of upper Pripyat basin on the environment

*Maria Boiaryn*¹

PhD (Geography), Associate Professor of the Department of Ecology and Environmental Protection,

¹ Lesya Ukrainka Volyn National University, Lutsk, Ukraine,

e-mail: mariasun140314@gmail.com,  <http://orcid.org/0000-0001-9822-5897>;

*Alla Nekos*²

DSc (Geography), Professor, Head of the Department of Environmental Safety and Environmental Education of the Institute of Ecology,

² V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine,

e-mail: alnekos999@gmail.com,  <http://orcid.org/0000-0003-1852-0234>;

*Volodymyr Radzii*¹

PhD (Geography), Associate Professor of the Department of Ecology and Environmental Protection,

e-mail: kiver_rad@ukr.net,  <https://orcid.org/0000-0001-8757-4944>;

*Iryna Netrobchuk*¹

PhD (Geography), Associate Professor of the Department of Physical Geography,

e-mail: iryna.nim@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0002-8633-7426>;

*Larisa Kotsun*¹

PhD (Biology), Associate Professor of the Department of Botany and Methods of Teaching Natural Sciences,

e-mail: kocunlarisa@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0002-3202-7561>;

*Maria Lugowska*³

DSc (Engineering), Associate Professor of the Institute of Agriculture and Horticulture,

³ University of Natural Sciences and Humanities, Siedlce, Poland,

e-mail: maria.lugowska@uph.edu.pl,  <http://orcid.org/0000-0001-5284-7965>

ABSTRACT

Introduction. One of the alternative fuel and energy sources that is economically attractive and available at the regional level is peat extraction and peat briquette production. This direction of development of the mining industry is especially relevant in regions rich in peat deposits which include Sumy, Chernihiv, Kyiv, Zhytomyr, Volyn, Rivne regions. The Volyn region is one of the regions rich in peat deposits that can be used to meet the economic needs of the population.

The objective of the work is the assessment and territorial distribution of natural reserve funds within the Pripyat River basin in Volyn.

Methods. The research used a complex and systematic approach, as well as mathematical, cartographic and comparative descriptive methods.

Results. There are 4 promising peat deposits in the region which are located in large peat bogs of the upper reaches of the Pripyat River basin, namely Stobykhiv, Koza-Berezyna, Velyke Bagno and Velyke Boloto. One of the newest peat deposits which is being exploited in the Volyn region in accordance with the specified environmental conditions for the planned activity listed in the conclusions of the environmental impact assessment is the Koza-Berezyna peatland. The deposit includes four areas, the Sadok tract (area of 108 ha), the Dolyna tract (146.1 ha), the Robittya tract (129.8 ha), the Kiliyev tract (170.8 ha). Extraction of raw peat as the material for the production of peat briquettes at the Koza-Berezyna deposit uses an industrial surface milling method. It is planned to rehabilitate the land plots disturbed by peat mining and return them to their natural wetland state. Most of the carting channels will be filled with peat from adjacent areas, the existing network of melioration channels will be abandoned by the time of extraction. A sanitary protection zone (SPZ) is established for the period of operation of the peat deposit, the standardized size for the Koza-Berezyna deposit being 100 m. During peat extraction, the pollution of the surface layer of atmospheric air at the SPZ boundary does not exceed hygienic standards. The quality of atmospheric air within the enterprise influence corresponds to the maximum permissible content of pollutants at which there is no negative impact on human health and the state of the environment.

Conclusions. The project contains measures to reduce the impact on the environment: implementation of control over the volume and composition of pollutants emitted into the atmosphere and the levels of physical impact; development of special measures for the protection of atmospheric air in case of man-made and natural emergency situations.

Keywords: peat deposit, organic fuels, pollutant concentration, peat, sanitary protection zone.

In cites: Boiaryn Maria, Nekos Alla, Radzii Volodymyr, Netrobchuk Iryna, Kotsun Larisa, Lugowska Maria (2025). Impact of peat extraction from the peatlands of upper Pripyat basin on the environment. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (62), 401-411. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-30>

Introduction. The problem of energy stability is of today, and the reasons are the expected depletion of the reserves of organic fuels, imperfection and low

© Boiaryn Maria, Nekos Alla, Radzii Volodymyr, Netrobchuk Iryna, Kotsun Larisa, Lugowska Maria, 2025

efficiency of technologies for their use, harmful impact on the environment, as well as the consequences of military operations. Every day, great attention is paid to energy independence and stability to avoid such emergency situations in the utility sector as the loss of heat and blackouts in the winter season. One of the alternative fuel and energy sources that is economically attractive and available at the regional level is peat extraction and peat briquette production. Since peat, like brown coal, has a low caloric value, it can be used only as a local fuel, which can partially solve the problem of providing fuel for small solid-fuel boiler houses that can autonomously heat residential buildings and social institutions of small settlements, mainly in rural areas, in winter, thereby reducing the load on the country's power grid. This direction of development of the mining industry is especially relevant in regions rich in peat deposits, which include Sumy, Chernihiv, Kyiv, Zhytomyr, Volyn, Rivne regions [1, 20].

Borrowing the experience of European countries and creating appropriate conditions for investment activity in the peat industry, the Polissia region which is rich in this local industry could solve the problem of heat supply by partially replacing gas with peat. In addition, it is used in agriculture for the manufacture of organic fertilizers, peat insulation boards, as organic fertilizer itself. Peat is also used in the chemical industry to produce combustible gases, tar, coke, ethyl alcohol, artificial wax, and many other needs [3, 4].

Volyn region belongs to the regions rich in peat deposits that can be used to meet the economic needs of the population. There are 4 promising peat deposits in the region which are located in large peat bogs, Stobykhiv, Koza-Berezyna, Velyke Bagno and Velyke Boloto. Additionally, the territories of these peat bogs border or include nature reserve fund (NRF) objects. For instance, the Koza-Berezyna peat bog borders the Rivne nature reserve, the Velyke Bagno peat bog includes the reserves "Berezovo-Vilkhovy" and "Graddivsky", the Velyke Boloto peat bog includes the reserves "Sofiyanivskyi rezevat", "Dubova", "Svitly". Therefore, the extraction of peat in these massifs requires an environmental impact assessment (EIA) procedure to prevent negative impact and preserve the NRF objects [2, 5, 15, 20, 21].

One of the newest peat deposits which is being exploited in the Volyn region in accordance with the specified environmental conditions for the planned activity listed in the EIA conclusions is the Dolyna tract of the Koza-Berezyna peatland.

An alternative source of fuel and energy that is economically attractive and available at the regional level is peat extraction and peat briquette production [2]. The state and prospects for the development of the peat mining industry require detailed and in-depth study. The study of the state of peat marshlands of

Ukraine was covered by a number of scientists, e.g. G. B. Marushevsky, I. S. Zharuk [4], R. S. Truskavetsky [22]. The development of the concept of balanced development of bogs and peatlands of Ukraine, as well as the ecological certification of bogs, peatlands and drained lands of Ukraine, is discussed by Konishchuk V. V. [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 23, 24] and Bondar A. I. [1].

The objective of the work is the assessment and territorial distribution of NRF within the Pripjat River basin in Volyn.

Research methods and raw data. The research process used instrumental, calculation, generalization, systematization, comparative-analytical, descriptive, cartographic methods.

The concentration of pollutants in the surface layer of atmospheric air was calculated at points on the boundary of the regulatory sanitary protection zone (SPZ), taking the intersection of the regulatory SPZ with the coordinate grid as the calculation point.

The grid step is determined depending on the SPZ size (with regulatory SPZ=100 m, the grid step is taken as 50 m). The dimensions of the calculation site are 2000×2000 m, the grid step is 50×50 m. The pollutant dispersion was calculated at the maximum emission capacity taking into account the production technology (under the condition of simultaneous operation of all sources) with the simultaneous possibility of operation of quarry mechanisms and vehicles for transporting peat (within the deposit).

The emissions of pollutants and greenhouse gases into the air from internal combustion engines of vehicles was calculated according to the «Methodology for calculating emissions of pollutants and greenhouse gases into the air from vehicles» [10, 11].

Research results. The Volyn part of the Koza-Berezyna peat deposit is located within the Manevychi district of the Volyn region (since 2021, the Kamin-Kashyrskyi district). The deposit was named and localized during a detailed exploration of the peat deposit by the Kyiv Geological Exploration Expedition of the Kyivgeology Trust in 1968-1969. It covered the territory of the Volodymyrets district of the Rivne region and the Manevychi district of the Volyn region. The district territory has significant peat reserves estimated at 51.3 million tons, including the total reserves of the Volyn part of the Koza-Berezyna deposit in the amount of 1.432 million tons (40% relative humidity).

The objectives of the planned activity are the development of peat reserves, specified by the State Committee of Ukraine for Land Use and Mineral Resources (No. 3767 of December 16, 2016) as a separate object of subsoil use within the reserves of category C1 for the extraction of peat suitable for briquette production, compost preparation and as peat soil.

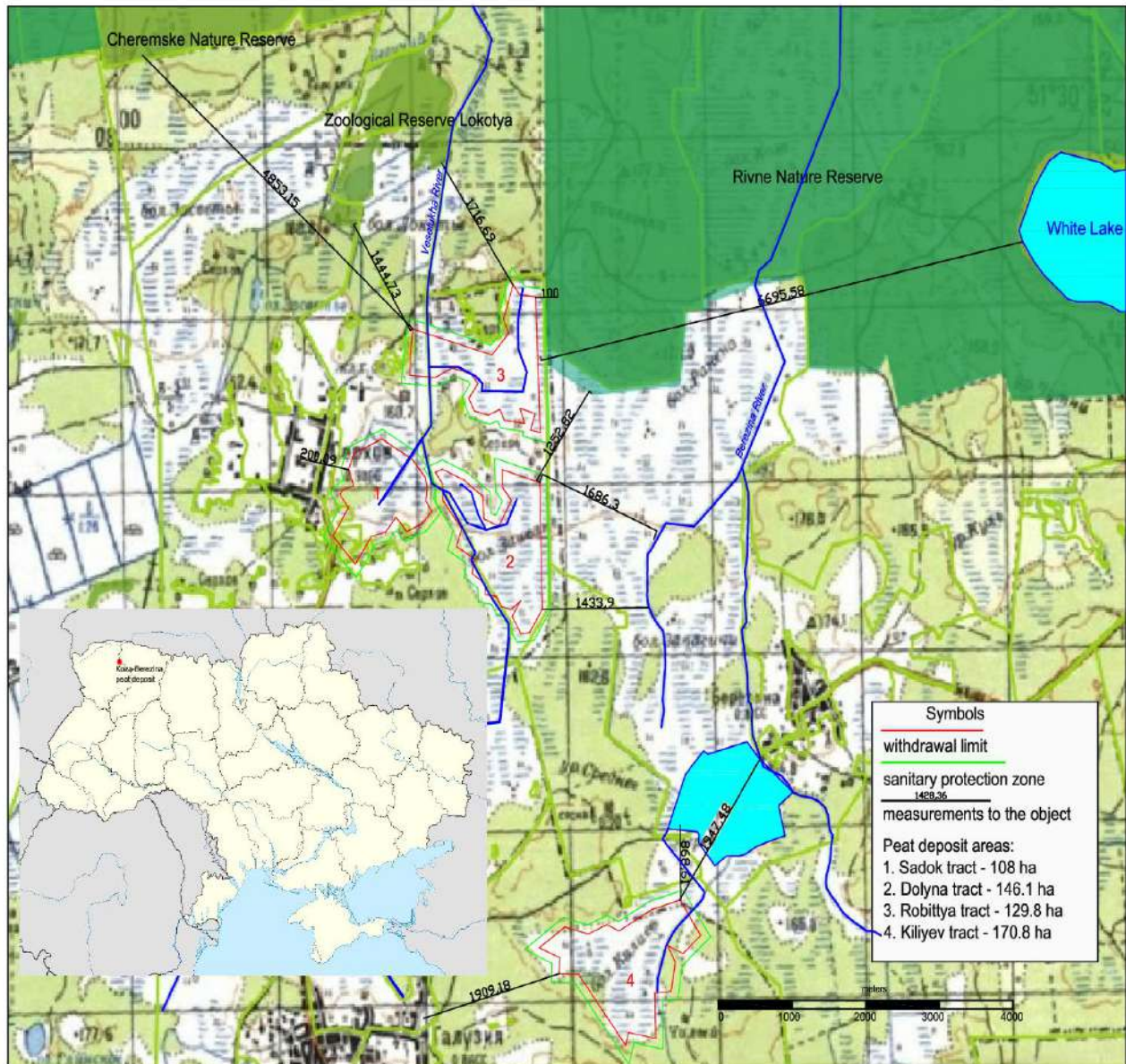


Fig. 1. Map of the Koza-Berezhna peat deposit in the Volyn region

The deposit includes four areas, the Sadok tract with an area of 108 ha, the Dolyna tract (146.1 ha), the Robittya tract (129.8 ha), the Kiliyev tract (170.8 ha).

Mandated by the Conclusions on the environmental impact assessment of the planned activities ("Peat extraction at the Koza-Berezhna deposit, Manevychi district, Volyn region", No. 21/01-20208276495/1 of 29.11.2021), the planned activities at the Koza-Berezhna deposit will implement preparatory, extraction and reclamation work [6, 25].

Preparation of the deposit for extraction operations, further exploitation and completion of extraction will involve the following types of work: swamp preparation; drainage of the deposit; extraction; reclamation.

To organize peat extraction, first of all, drainage canals were cut and the existing main canal was cleaned, to ensure effective drainage from work areas

during precipitation in the spring-summer and autumn periods, to ensure the regulatory level of drainage of peat deposits and maneuverability of all types of equipment that will be used in preparing the peat deposit for operation, peat extraction, drying, storing, and shipping to the peat plant.

The field uses a milling method of extraction which is the most common but also the most sensitive to changes in weather conditions. The peat is loosened to a depth of up to 2 cm by a tractor with installed attachments, a milling drum or a knife mill. The mills remove a thin layer turning it into crumbs. The peat loosened in this way dries in the sun. During drying, the peat is turned over 1 to 3 times using an agitator which is also installed on the tractor. After the milled peat reaches the required moisture, it is collected in rolls on carts. Rolled peat is less able to absorb moisture and therefore remains dry. Milled

peat is collected in field stacks after drying until the moisture content of the milled peat reaches 60%. Harvesting of rolls without any dry peat or wet chips is achieved by adjusting the position of the scraper working wall relative to the field surface and the bucket elevator of the harvesting machine. Milled peat can be harvested at any time of the day, but peat that has a tendency to self-ignite is harvested in the evening and at night.

To reduce wetting of peat, the surface of the stacks should be flat without depressions. The angle of inclination of the side and end slopes should vary within 40-42%. The cross-section, as a rule, should be triangular with a stack height of up to 7 m, or trapezoidal with a top width of no more than 2 m for higher stacks. The length of each stack on the working sites is usually 75-80 m. Peat is stacked at the edge of the length of the working area which corresponds to the distance between the shaft channels and is equal to 500 m. The 500 m distance of the length of the peat production area consists of the length of the passage of the harvesting machine (450 m) and two stacking strips $(25 \times 2) = 50$ m. According to the annual peat extraction program, the storage period of peat in stacks is up to 6 months.

Milling, stirring, rolling and harvesting of peat form the so-called "harvesting cycle". A new process of milling the surface of the peat bed begins immediately after harvesting. Milled peat can be dried only in dry sunny weather, thus its extraction is limited to the warm season.

Extraction of peat as a raw material for the production of peat briquettes at the Koza-Berezyna deposit will utilize industrial surface milling method. The extraction of milled peat in the amount of 80.0–100.0 thousand tons per year requires the following equipment: MTF-14 milling drums (2 pcs), MTF-22 agitators (3 pcs), an MTF-33AS rake (1 pc), MTF-43A peat harvesting machines (3 pcs), an MTF-71A stacking machine (1 pc).

Peat extraction is associated with increased fire risk. Organizational and technical measures to ensure fire safety during peat extraction must meet the requirements of the "Fire Safety Rules for Peat Industry Enterprises" and "Fire Safety Rules in Ukraine". The following fire prevention measures are planned to ensure fire safety in peat extraction fields: organization of a fire protection service; purchase of fire-fighting equipment and supplies; arrangement of security measures; provision of water supplies for fire extinguishing.

The project includes the reclamation of land plots disturbed by peat mining returning them to their natural wetland state. Most of the carting channels will be filled with peat from adjacent areas, and the existing network of melioration channels will be abandoned by the time of extraction.

A sanitary protection zone (SPZ) is established for the period of operation of the peat deposit. For an industrial enterprise that is a source of atmospheric pollution, SPZ is established in accordance with the current sanitary standards under the "State Sanitary Rules for Planning and Development of Settlements" approved by the order of the Ministry of Health of Ukraine No. 173 of 19.06.96 (SSR No. 173). According to the SSR No. 173, Appendix 4, the standard SPZ size for the Koza-Berezyna deposit is 100 m as an "enterprise for peat extraction by milling method" which corresponds to Class 4 of the sanitary classification of enterprises. The adequacy of the SPZ size was checked by calculating surface concentrations of pollutants [7, 8, 9].

The standard size of the sanitary protection zone was met. There are no residential buildings, pre-school activities, schools, medical preventive institutions, sports facilities, and protection zones of water supply sources in the SPZ.

The expected concentrations of pollutants in the affected area do not exceed hygienic standards. The quality of atmospheric air within the affected area satisfies the maximum permissible content (MPC) of pollutants at which there is no negative impact on human health and the state of the environment.

The deposit extraction technology involves processes that lead to emissions of pollutants into the atmosphere. Sources of pollutant emissions into the atmosphere are peat drying, peat loading, and the operation of internal combustion engines of mining equipment. A characteristic feature of technological burst emissions is the lack of a time pattern and time interval for performing work. The operation of technological equipment and, as a result, the release of pollutants is according to production needs.

Sources of pollutant emissions into the atmosphere on the territory of the peat deposit are:

Source No. 1 – stirring and rolling milling chips, resulting in the emission of substances in the form of solid suspended particles;

Source No. 2 – collecting and stacking peat – the emission of solid suspended particles;

Source No. 3 – loading peat into dump trucks – the emission of solid suspended particles;

Source No. 4 – motor transportation of peat within the deposit – the emission of solid suspended particles;

Source No. 5 – operation of internal combustion engines of mechanisms and vehicles – the emission of nitrogen dioxide, carbon monoxide, sulfur dioxide, nitrogen oxide, soot, volatile organics, benzopyrene, methane, carbon dioxide.

The pollutant dispersion was calculated in the option where all emission sources operate simultaneously. Mean annual data on the operating mode and parameters of technological equipment are required

and presented in Table 1.

The criteria for assessing the impact on the environment are the emission capacity per unit of time (g/s) and gross emission (t/yr), as well as the standard

of atmospheric air quality which reflects the maximum permissible content (MPC) of pollutants in atmospheric air at which there is no negative impact on human health and the state of the environment.

Table 1

Input data for calculating pollutant emissions

Factor	Unit of measurement	Extraction operations
Work type		Seasonal
Workdays per year	day	129
Work shifts per day	shift	1
Shift duration	hour	12
Workload: yearly	'000 ton	80.0
per shift (average)	ton	319.3
per hour (max)	ton	26.6
Total expended fuel and materials		
Diesel fuel	ton/year	149,2

Emissions of pollutants are calculated in accordance with the accepted techniques for calculating pollutants from unorganized sources of atmospheric pollution [1, 6, 25]. All coefficients are taken according to the tabulated data of the technique in relation to the specified characteristics of the technological process. Production capacity and operating hours of emission sources are in accordance with the technological task. The initial data for calculating the volume of pollutant emissions from motor vehicles are characteristics of the transport fleet, fuel consumption, and specific emissions of pollutants per unit of fuel used.

Calculations of pollutant concentrations in atmospheric air employed "EOL+" v. 5.3.8 software. Software algorithms implement the OND-86 "Methodology for calculating concentrations in atmospheric air of hazardous substances from enterprise emissions". The search of unfavorable wind speeds is done by the program automatically based on input speeds [19, 25].

Based on the analysis of pollution maps in the calculation nodes, atmospheric pollution is listed in Table 5 (in parts of MPC). The results showed that, taking into account background pollution, for the substances that required calculations (these were defined as having dispersion over 0.05 MPC), the surface concentrations of pollutants emitted at the Koza-Berezyna deposit do not exceed regulatory requirements.

Thus, the contribution of the projected activity to the pollution of the surface layer of atmospheric air at the SPZ borders (100 meter size) does not exceed hygienic standards. Ambient air quality corresponds to MPC of pollutants with negligible adverse effect to health and environment. The effects on the air environment is considered acceptable.

The Koza-Berezyna peat deposit is located in the basin of the Veselukha River, a right tributary of the Pripyat River, and the main canal of the Soyne peat

massif, the bed of which is canalized with a minor draining role of the river. The watershed between the Veselukha River basin and the Berezina River basin is not clearly defined. The water intake has a high percentage of wetlands (over 30%). The river valley is practically not pronounced, flat, and imperceptibly merges with the adjacent plain area. The main canal of the Soyne peat massif serves as a water intake at the peat deposit. The length of the main canal is 9 km, of which 5.7 km is the canalized bed of the Veselukha River. The parameters of the main canal allow water to be taken from sections of the Koza-Berezyna peat deposit without deepening. Drainage waters, in terms of chemical composition and other characteristics, are identical to the waters of the Veselukha River and main canals. The decrease in the groundwater level due to the drainage network of canals in the development area and the adjacent territories is at depth of 1.5 to 2.0 m, to enable mechanized surface-layer mining operations, and the water level in the canals is controlled by sluice gates. Since at a distance of 500 m from the development boundary the groundwater depth is 0.4–0.6 m, the effect of drainage on villages further off is virtually absent. Pollution of groundwater as a result of peat extraction is not expected. Surface and groundwater are not suitable for drinking and domestic needs.

The impact on certain adjacent lands of the forest fund is assessed as positive because forest stands grow in conditions of waterlogging and flooding.

No objects of the nature reserve fund fall within the boundaries of peat areas that are involved in industrial development and thus do not come under negative impact as a result of raw peat extraction. The closest to the territory of the peat deposit are the Cheremsky Nature Reserve, the Rivne Nature Reserve and the Lokottia General Zoological Reserve (Fig. 1). The Rivne Nature Reserve borders the sanitary protection zone of the Robittya site, the length of

Table 2

Emission parameters of air-polluting sources

Source No	Emission source	Work hours	Source parameters		Map coordinates of source		Characteristics of dust and gas mixture at the outlet			Pollutant code	Pollutant	Specific emission	
			Height, m	Diameter, m	X1	Y1	Flow, m ³ /s	Velocity, m/s	Temperature, °C			g / s	t/year
1	Stirring, rolling of peat	1548	5	0.5	1700	2000	0.30	1.5	24.7	2902	Suspended solid particles	0.0078	0.348
2	Peat collecting and stacking	1548	5	0.5	1750	1750	0.30	1.5	24.7	2902	Suspended solid particles	0.0156	0.174
3	Peat loading	1548	5	0.5	1550	1550	0.30	1.5	24.7	2902	Suspended solid particles	0.0124	0.218
4	Peat transportation	1548	5	0.5	1520	1500	0.30	1.5	24.7	2902	Suspended solid particles	0.0024	0.085
5	Internal combustion engines	1548	5	0.5	1500	1500	0.30	1.5	24.7	328	Soot	0.0278	0.691
										301	Nitrogen oxides (as nitrogen dioxide [NO + NO ₂])	0.23	5,636
										304	Nitrogen(I) oxide (N ₂ O)	9·10 ⁻⁵	0.022
										330	Sulfur dioxide	0.0311	0.772
										337	Carbon monoxide	0.26	6,498
										11812	Carbon dioxide	22.6633	563,271
										2754	Non-methane volatile organic compounds (NMVOC)	0.059	1,465
										410	Methane	0.0018	0.045
										703	Benzopyrene	0.0002	0.0054

Table 3

Pollutants released into the atmosphere during extraction operations

Pollutant	MPC, mg/m ³	Hazard class	Specific emission, t/yr
----- 2902 Suspended solid particles (microparticles and fibers)	0,5		0,825

Table 4

Pollutants released into the atmosphere from internal combustion engines (mobile sources)

Pollutant	MPC, mg/m ³	Hazard class	Specific emission, t/yr
----- 328 Soot	0,15		0,691
----- 301 Nitrogen oxides (as nitrogen dioxide [NO + NO ₂])	0,02	3	5,636
----- 304 Nitrogen(I) oxide (N ₂ O)	0,4	3	0,022
----- 330 Sulfur dioxide	0,5	3	0,772
----- 337 Carbon monoxide	5	4	6,498
----- 11812 Carbon dioxide	0	0	563,271
----- 2754 NMVOC	1	4	1,465
----- 410 Methane	50	0	0,045
----- 703 Benzopyrene	0,0001	1	0,0054

Table 5

Pollutant concentration within the affected area, taking into account background pollution

No	Pollutant	MPC, mg/m ³	Background pollution, in parts of MPC C _b	Pollution at the SPZ boundary			
				in parts of MPC (max)		mg/m ³ (max)	
				C _p	C _p + C _b	C _p	C _p + C _b
1	Solid suspended particles	0.5	0.4	0.014	0.414	0.007	0.207
2	Nitrogen dioxide	0.2	0.4	0.40	0.80	0.08	0.16
3	Soot	0.15	0.4	0.065	0.465	0.00975	0.06975
4	Benzopyrene	0.0001	0.4	0.50	0.90	0.00005	0.00009

the common border is 1 km. The Cheremsky Nature Reserve is located 6 km northwest of the peat areas (Sadok and Robittya tracts) of the Volyn part of the Koza-Berezyna peat deposit. The catchment area of the Veselukha River near the peat raw material development site No. 3 is in the immediate vicinity of the Zaserkhivya swamp wetlands, about 18,728 hectares, which constitute ~1.5-2.0% of the area of wetlands of the Biloozersky massif of the nature reserve, and a forest with an area of 50,771 hectares (pine-alder-birch forest). If the groundwater level in the adjacent territories of the reserve decreases by 1 to 2 meters,

some transformation and decrease in the state of forests and swamp vegetation may occur; however, this will not lead to changes in the typological and formational structure of vegetation, since the groundwater level decrease of 1 meter is within seasonal fluctuations, and their regime will be close to the current one.

The preparatory and extraction operations of the peat deposit generate such urban and industrial waste as solid household waste; used batteries; used technical lubricants; used oil filter; cleaning materials dirty with petroleum products; septic tank sludge.

Table 6

Wastes generated during the implementation of the planned activity

Waste type	Annual volume, t	Waste management
Waste formed in transportation operations, not otherwise specified or combined	0.0011	Stored on site for further transfer to specialized disposal company
Batteries and other accumulators	0.6514	Stored on site for further transfer to specialized disposal company
Oils and lubricants, motor or transmission or otherwise	1.4050	Stored on site for further transfer to specialized disposal company
Wiping materials	0.2580	Stored on site for further transfer to specialized disposal company
Urban waste, mixed, including binned garbage	0.7296	Transferred to the municipal solid waste landfill (village of Serkhiv)
Septic tank sludge	0.9520	Transferred for disposal to the utility company (village of Prylisne)

Collection, transportation, utilization, and burial of household waste is performed by the local utility company according to the contract. Accumulation and utilization of worn out work clothes will take place outside the work site and field site, with planned write-offs by the company order.

Solid household waste is collected separately. Specifically, technological scheme 1 uses two containers. One container, blue with the inscription "Recycling", is intended for collecting wastes suitable for re-use and recycling, except organic components. Another container, gray, is intended for collecting the rest of mixed waste, including the organic component of household waste.

To minimize negative impact on the surrounding environment during the temporary storage of solid waste before processing and disposal, specially equipped fenced places are provided.

Also, measures to reduce anthropogenic impact on the environment are provided, namely:

- controlling the volume and composition of pollutants emitted into the atmosphere and levels of physical impact;
- installing protective grilles on tubular crossings of cart channels to retain large particles (more than 25×25 mm) of peat to prevent them from enter-

ing inter-cart channels;

- periodic flushing of pipes of cart channel crossings, cleaning the bottom of the cart channel network and drainage channels from silt, and constructing a silt trap in the idle part of the main channel to settle the smallest particles of milled peat;

- ensuring the integrated use of raw material resources. Ensuring full collection, proper storage and transfer of waste for re-use/disposal;

- surveying and mining technical control over the development of the deposit;

- measures are planned to rehabilitate the soil and the excavated areas in general to reduce the damage from the quarry operation, and it is prohibited to disturb or pollute the surrounding area;

- all mechanisms will be maintained in good condition, so that their noise and vibration characteristics comply with the technical specifications;

- after the completion of the field development, the territory will be rehabilitated.

Conclusions and prospects for further research. There are 4 promising peat deposits in the region, which are located in large peat bogs of the upper reaches of the Pripyat River basin, Stobykhivske, Koza-Berezyna, Velyke Bagno and Velyke Boloto. One of the newest peat deposits exploited in the

Volyn region is Koza-Berezyna. Peat as a raw material for the production of peat briquettes is extracted by industrial surface milling method. It is planned to rehabilitate land plots disturbed by peat mining and return them to their natural state of wetlands. At the same time, most of the carting channels will be filled with peat from adjacent areas, the existing network of meliorative channels will be abandoned by the time

of extraction. A set of measures aimed at restoring and recultivating the peat mining area is also planned, which include monitoring both the volume and composition of pollutants emitted into the atmospheric air or surface waters and levels of physical impact, as well as recultivation of the territory, soils, and mined areas as a whole, including prohibiting disturbance or contamination of the adjacent territory.

Bibliography

1. Бондар А. І., Коніщук В. В. (2012). Екологічна паспортизація боліт, торфовищ та осушених земель України. *Екологія боліт і торфовищ (збірник наукових статей)*. Київ: ДІА, 27 - 42.
2. 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>
3. Боярин М. Екологічна оцінка якості масивів поверхневих вод басейну верхів'я річки Прип'ять. *Науковий вісник Вінницької академії безперервної освіти. Серія «Екологія. Публічне управління та адміністрування»*. 2024. 2. С. 19-23. <https://doi.org/10.32782/2786-5681-2024-2.03>.
4. Водно-болотні угіддя України (2006). За ред. Г. Б. Марушевського, І. С. Жарук. Київ, 241-246.
5. Дідух Я.П., Шеляг-Сосонко Ю.Р. (2003). Геоботанічне районування України та суміжних територій. *Український ботанічний журнал*. 60, 1, 6-17.
6. Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів ДСП 173-96 МОЗ України №173 від 19.06.1996.
7. Закон України «Про відходи» (187/98-ВР від 05.03.1998).
8. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» (№ 1264-XII від 25.06.1991).
9. Закон України «Про оцінку впливу на довкілля» (№ 2059-VIII від 23.05.2017).
10. Збірник методик розрахунку вмісту забруднюючих речовин у викидах від неорганізованих джерел забруднення атмосфери (2000). Донецьк, УкрНТЕК, 35.
11. Збірник показників емісії (питомих викидів) забруднюючих речовин в атмосферне повітря різними виробництвами (1-3) (2004). Український науковий центр технічної екології. Донецьк, 45.]
12. Коніщук В. В. (2010). Концепція збалансованого розвитку боліт і торфовищ України. *Агроекологічний журнал*. (4), 18-23.
13. Коніщук В.В., Проневич В.А., Єгорова Т.М., Шумигай І.В. (2015). Екологічні основи збалансованого розвитку ландшафтів водно-болотних угідь і торфовищ: моногр. Київ: ДІА, 190.
14. Коніщук В.В., Ходинь О.Б., Христецька М.В. (2022). Природоохоронна, фітосозологічна оцінка торфовища ПЛАВ-II (Житомирська обл.). Екологічна безпека та збалансоване природокористування в агропромисловому виробництві: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. Част. 2. (м. Київ, 7-8 лип. 2022 р.). Київ, 77-81.
15. Коніщук В.В. (2013). Екологічні основи розвитку та охорони торфових боліт Полісся: автореф. дис. ... д-ра біол. наук: 03.00.16. Київ, 44.
16. Коніщук В.В., Шумигай І.В., Коваль С.І. та ін. (2017). Методичні рекомендації оцінки фіто-, зооінвазійності. За ред. В.В. Коніщука. Київ: ДІА, 36.
17. Коніщук В.В., Бобрик І.В., Булаков В.П. та ін. (2014). Охорона і заповідання водно-болотних угідь: метод. реком. Київ: ДІА, 65.
18. Коніщук В.В. (2015). Концепція і стратегія збалансованого розвитку ландшафтів водно-болотних угідь і торфових екосистем України. Київ: ДІА, 190 с.
19. Методикою розрахунку викидів забруднюючих речовин та парникових газів у повітря від транспортних засобів (затверджена наказом Держкомстату України від 13 листопада 2008 року № 452).
20. Nekos Alla, Boiaryn Mariia, Tsos Oksana, Netrobchuk Iryna, Voloshyn Volodymyr (2023). Determination of the macrophyte index MIR as an indicator of water quality in the Pripet river. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (58), 360-370. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-27>
21. Nekos, A., Boiaryn, M., Karpyuk, Z., Kotsun, L., Andreyeva, V., & Lugowska, M. (2024). Evaluation of the efficiency of functioning of the nature reserve fund in the Pripet river basin in the Volyn region. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (60), 389-398. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-29>
22. Грускавецький Р. С. Торфові ґрунти і торфовища України. Харків: «Міськдрук». 2010. 278 с.
23. Skyba V. P., Kopylova O. M., Vozniuk N. M., Likho O. A., Pryshchepa A. M., Budnik Z. M., Gromachenko K. Y., Turchina K. P. (2021). Ecological risks in river basins: a comparative analysis of steppe and forest Ukrainian areas. *Ukrainian Journal of Ecology*. 11 (1), 306-314. doi: https://doi.org/10.15421/2021_46
24. Фесюк, В., Бедункова, О., Нетробчук, І., & Боярин, М. (2023). Сучасний стан водокористування у басейні Прип'яті Волинської області. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, (1), 47-55. doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2023-1-6>

25. Бозута С., Зубко Л., Радзій В. (2021). Звіт з оцінки впливу на довкілля планованої діяльності видобування торфу на родовищі «Ко́за-Бере́зина» Маневицького району Волинської області. Луцьк: КП "Волиньприродресурс" Вол. облради, 351.

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

References

1. Bondar A. I., Konishchuk V.V. (2012). Environmental certification of swamps, peatlands and drained lands of Ukraine. In: *Ecology of swamps and peatlands (a collection of scientific articles)*. DIA, Kyiv, 27–42. [in Ukrainian]
2. 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. [in Ukrainian] <https://doi.org/10.48077/sciHor12.2023.99>
3. Boiaryn M. (2024). Ecological assessment of the quality of surface water bodies of the upper Pripyat River basin. *Scientific Bulletin of the Vinnytsia Academy of Continuing Education. Series "Ecology. Public Management and Administration"*, 2, 19–23. <https://doi.org/10.32782/2786-5681-2024-2.03>. [in Ukrainian]
4. *Ukraine Wetlands*. Eds. G.B. Marushevskiy, I.S. Zharuk. (2006). Kyiv: DIA, 241–246. [in Ukrainian]
5. Didukh Ya.P., Shelyag-Sosonko Yu.R. (2003). Geobotanical zoning of Ukraine and adjacent territories. *Ukrainian Botanical Journal*, 60 (1), 6–17. [in Ukrainian]
6. State Sanitary Rules for the Planning and Development of Settlements of the Ministry of Health of Ukraine No. 173 of 19.06.1996. [in Ukrainian]
7. Law of Ukraine "On Waste" (187/98-BP of 05.03.1998). [in Ukrainian]
8. Law of Ukraine "On Environmental Protection" (No. 1264-XII of 25.06.1991). [in Ukrainian]
9. Law of Ukraine "On Environmental Impact Assessment" (No. 2059-VIII of May 23, 2017). [in Ukrainian]
10. Handbook of techniques for calculating the content of pollutants in emissions from unorganized sources of atmospheric pollution (2000). UkrNTEK, Donetsk, 35.
11. Handbook of indicators of emissions (specific emissions) of pollutants into atmospheric air by various industries (2004). Vol. 1–3. Ukrainian Scientific Center of Technical Ecology, Donetsk. 45p. [in Ukrainian]
12. Konishchuk V.V. (2010). Concept of balanced development of swamps and peatlands of Ukraine. *Agroecological journal*, 4, 18–23. [in Ukrainian]
13. Konishchuk V.V., Pronevych V.A., Yegorova T.M., Shumygai I.V. (2015). Ecological basis of balanced development of wetland and peatland landscapes. DIA, Kyiv, 190. [in Ukrainian]
14. Konishchuk V.V., Khodyn O.B., Khrystetska M.V. (2022). Environmental protection, phytosozological assessment of the PLAV-II peatland (Zhytomyr region). Ecological safety and balanced use of nature in agro-industrial production. *Proceedings Int'l Sci.-Pract. Conf. Part 2*. (Kyiv, July 7–8), 77–81. [in Ukrainian]
15. Konishchuk V.V. (2013). Ecological basis of development and protection of peat bogs of Polissya. *Dr. Sci. (Biology) thesis*. Kyiv. 18–23. [in Ukrainian]
16. Konishchuk V.V., Shumygai I.V., Koval S.I. et al. (2017). Methodological recommendations for assessing phyto- and zooinvasiveness. Ed. V.V. Konishchuk. DIA, Kyiv. 253.
17. Konishchuk V.V., Bobryk I.V., Bulgakov V.P. et al. (2014). Protection and preservation of wetlands: Methodological recommendations. DIA, Kyiv, 65. [in Ukrainian]
18. Konishchuk V.V. (2015). Concept and strategy for balanced development of wetland landscapes and peat ecosystems of Ukraine. DIA, Kyiv, 190. [in Ukrainian]
19. Methodology for calculating emissions of pollutants and greenhouse gases into the air from vehicles (approved by order of the State Committee of Statistics of Ukraine No. 452 of November 13, 2008) [in Ukrainian]
20. Nekos Alla, Boiaryn Mariia, Tsos Oksana, Netrobchuk Iryna, Voloshyn Volodymyr (2023). Determination of the macrophyte index MIR as an indicator of water quality in the Pripet river. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (58), 360–370. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-27>
21. Nekos, A., Boiaryn, M., Karpyuk, Z., Kotsun, L., Andreyeva, V., & Lugowska, M. (2024). Evaluation of the efficiency of functioning of the nature reserve fund in the Pripet river basin in the Volyn region. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (60), 389–398. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-29>
22. Truskavetsky R. S. (2010). *Peat soils and peat deposits of Ukraine*. Miskdruk, Kharkiv, 278. [in Ukrainian]
23. Skyba V. P., Kopylova O. M., Vozniuk N. M., Likho O. A., Pryshchepa A. M., Budnik Z. M., Gromachenko K. Y., Turchina K. P. (2021). Ecological risks in river basins: a comparative analysis of steppe and forest Ukrainian areas. *Ukrainian Journal of Ecology*. 11 (1), 306–314. doi: https://doi.org/10.15421/2021_46
24. Fesyuk V., Bedunkova O., Netrobchuk I., Boiaryn M. (2023). Analysis of the current state of water use in the Pripyat basin of Volyn region. *Problems of chemistry and sustainable development*, 1, 47–55, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2023-1-6> [in Ukrainian]

25. Boguta S., Zubko L., Radziy V. (2021). Report on the environmental assessment of the planned activity of peat production at the goat-March deposit of the Manevichi district of Volyn region. Luts'k: KP "Volyn Natrodresurs" Vol. Regional Council, 351. [in Ukrainian]

Вплив видобування торфосировини з торфовищ верхів'я басейну річки Прип'ять на довкілля

Марія Боярин¹

к. геогр. н., доцент, кафедра екології та охорони навколишнього середовища,

¹ Волинський національний університет імені Лесі Українки, Луцьк, Україна;

Алла Некос²

д. геогр. н., професор, завідувачка кафедри екологічної безпеки

та екологічної освіти, ННІ Екології,

² Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна;

Володимир Радзій¹

к. геогр. н., доцент, кафедра екології та охорони навколишнього середовища;

Ірина Нетробчук¹

к. геогр. н., доцент, кафедра фізичної географії;

Лариса Коцун¹

к. біол. н., доцент, кафедра ботаніки та методики викладання природничих наук;

Марія Луговська³

д. техн. н., доцент, інститут землеробства і садівництва,

³ Природничо-гуманітарний університет, Седльце, Польща

Одним із альтернативних джерел палива та енергії економічно привабливим і доступним на регіональному рівні є видобуток торфу та виробництво торфобрикету. Цей напрямок розвитку видобувної промисловості особливо актуальним є у регіонах багатих покладами торфу до яких належать: Сумська, Чернігівська, Київська, Житомирська, Волинська, Рівненська області. Волинська область належить до регіонів багатих на поклади торфу які можуть бути використані для задоволення господарських потреб населення. На території області є 4 перспективних родовища торфу які розташовані у великих торфоболотних масивах верхів'я басейну річки Прип'ять : Стобихівське, Коза-Березина, Велике Багно та Велике Болото. Одним із найновіших родовищ торфу, яке експлуатується у Волинській області, відповідно до визначених екологічних умов провадження планованої діяльності, що зазначені у висновках ОВД, є видобуток торфосировини торфовища Коза-Березина. До складу родовища входять чотири ділянки: урочище Садок – площею 108 га; урочище Долина – площею 146,1 га; урочище Робіття – площею 129,8га; урочище Кілієв – площею 170,8 га. Видобування торфу, як сировини для виробництва торф'яних брикетів, на родовищі «Коза-Березина» здійснюється промисловим поверхнево-фрезерним способом. Передбачено рекультивацию порушених торфорозробками земельних ділянок та повернення їх у природний стан – водно-болотні угіддя. При цьому більшість картових каналів буде засипана торфом з прилеглих ділянок, існуюча мережа меліоративних каналів до часу видобування буде залишена. На час експлуатації родовища торфу встановлюється санітарно-захисна зона (СЗЗ), нормативний розмір санітарно-захисної зони для родовища «Коза-Березина», становить 100 м. Під час видобування торфу забруднення приземного шару атмосферного повітря на межі нормативної санітарно-захисної зони, розміром 100 метрів, не перевищує гігієнічних нормативів. Якість атмосферного повітря в межах впливу підприємства відповідає граничнодопустимому вмісту забруднюючих речовин, при якому відсутній негативний вплив на здоров'я людини та на стан навколишнього природного середовища.

Ключові слова: торфове родовище, органічні види палива, концентрації забруднюючих речовин, торф, санітарно-захисна зона.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 28 листопада 2024 р.

Прийнята 19 травня 2025 р.

Оцінка ступеня забруднення середньої течії р. Дніпро та розробка заходів його мінімізації

Олександр Касімов¹

д. техн. н., професор, начальник науково-технічного відділу,

¹ ДП «Український вуглехімічний інститут», Харків, Україна

e-mail: kassimov2011@gmail.com,  <https://orcid.org/0009-0007-2655-2478>;

Ігор Удалов²

д. геол. н., професор, кафедра фундаментальної та прикладної геології,

² Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, Україна,

e-mail: igorudalov8@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0003-3844-6481>;

Аліна Кононенко²

к. геол. н., доцент кафедри фундаментальної та прикладної геології,

e-mail: kononenko_alina01@ukr.net,  <https://orcid.org/0000-0003-0382-3910>

В статті оцінено вплив накопичувачів промислових стічних вод та шламів, надходження фільтрату та поверхневих стічних вод промислових підприємств на стан водного басейну р. Дніпра. Проведено моніторинг якості води у водних об'єктах басейну р. Дніпро із визначенням найпоширеніших забруднюючих речовин, у т.ч. сполук техногенних родовищ металів (іони Mn, Cu, Zn, Fe, Pb), сполук азоту, фенолів. Визначено середньорічні концентрації політвантів у період 2011-2022 рр. під впливом промислових об'єктів, комунального, сільського господарства. Проаналізовано досвід управління навколишнім природним середовищем, зокрема водними ресурсами, в європейських країнах. Наведено принципову схему надходження в поверхневі, підземні води та ґрунти токсичних сполук важких та рідкісних металів техногенних родовищ та їх вміст у ґрунті біля накопичувача стічних вод та шламів. Для шламонакопичувача комбінату «Запоріжсталь» розроблена принципова структурна схема мінімізації шкоди навколишньому природному середовищу від його впливу. Виконано модернізацію газоочисного обладнання аглоцеху та гідротехнічних споруд оборотного циклу водопостачання «мокрих» газоочисток доменних печей, що дозволило значно скоротити скидання стічних вод у водозбірну споруду «балка Капустянка». Розроблено нову маловідходну економічно ефективну технологію утилізації замасленої окалини з отриманням збагачених залізом брикетів або окатишів, придатних для використання в основному виробництві комбінату. Використано методику інтегральної оцінки якості навколишнього природного середовища для ранжування території шламонакопичувача комбінату «Запоріжсталь» за рівнем техногенного навантаження та ступеня цього впливу на окремі компоненти навколишнього природного середовища. Рекомендовано для запобігання забрудненню водного басейну р. Дніпро стічними водами та шламами комбінату «Запоріжсталь» виконати додатковий комплекс науково-дослідних та проектно-вишукувальних робіт з вивчення властивостей накопичених відкладів окалини в місцях її скидів у шламонакопичувач. Наведено основні заходи запобігання шкоди навколишньому природному середовищу. Приведено заходи щодо обмеження шкоди навколишньому природному середовищу.

Ключові слова: захист водного басейну, очищення стічних вод, металургійний комбінат, шламонакопичувач, важкі та рідкісні метали, фільтрат, ґрунтові та поверхневі води, утилізація шламів, завдана шкода навколишньому природному середовищу.

Як цитувати: Касімов Олександр, Удалов Ігор, Кононенко Аліна (2025). Оцінка ступеня забруднення середньої течії р. Дніпро та розробка заходів його мінімізації. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (62), 412-423. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-31>

In cites: Kasimov Oleksandr, Udalov Igor, Kononenko Alina (2025). Assessment of the degree of pollution of the middle reaches of the Dnipro River and development of measures to minimize it. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (62), 412-423. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-31> [in Ukrainian]

Постановка проблеми. Однією з найбільших транскордонних рік Європи є Дніпро, його басейн займає площу приблизно 511 тис.км², з яких 57,3 % знаходяться в Україні. Басейн охоплює понад 48 % території України і концентрує близько 80 % її водних ресурсів, що задовольняють продовольчі та питні потреби більше ніж 70 % населення країни. Щорічно у води Дніпра надходить понад 400 млн. м³/рік забруднених стоків. За значенням модифікованого індексу забруднення вода у середній та нижній течії річки Дніпро класифікується як «надзвичайно брудна» [1].

У басейні р. Дніпра виділено 3 основні зони забруднення поверхневих та підземних вод, які

сформовані під техногенним впливом [1-4].

Перша – зона розміщення хімічної промисловості та енергетики. У її межах виділено підзону впливу підприємств нафтопереробки – басейни рр. Березина, Орель, Сула та Псел, та підзона впливу підприємств харчової промисловості – Житомирська, Вінницька, Черкаська, Сумська, Полтавська та Харківська області.

Друга – зона гірничо-металургійного комплексу – басейн середньої течії р. Дніпро. Тут виділяють підзону розміщення підприємств гірничо-металургійного та енергетичного комплексів – Криворіжжя, Нікополь-Марганця, Дніпра, Дніпродзержинська та Запоріжжя.

У басейні р. Дніпро налічується понад 350 накопичувачів, з яких 279 шламонакопичувачів (ШН) та 22 – хвостосховища, решта – накопичувачі власне стічних вод (СВ). Найбільші накопичувачі скидів СВ та шламів розташовані в середній течії р. Дніпро у Дніпровському, Дніпродзержинському та Західно-Донбаському промислово-економічних районах, що становлять $\approx 75\%$ загальних скидів СВ. До них відносять накопичувачі СВ та шламів Північного, Центрального, Інгулецького, Південного та Новокриворізького гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК) Криворіжжя, Полтавського, Орджонікідзевського ГЗК, комбінатів «Запоріжсталь», Дніпровського алюмінієвого та ін. [2]

Третя – зона із розвиненим зрошувальним землеробством півдня України.

Проблеми еколого-економічної оцінки наслідків розміщення накопичувачів неочищених стічних вод та шламів, які часто виступають як техногенні родовища важких і рідкісних металів (ТРМ), а також створення підприємств для їх видобутку, з'явилися лише в останні роки. Проте на практиці в Україні ще не існує реально апробованої методики для такої оцінки.

Також перед Україною зараз стоять технічні та еколого-гігієнічні завдання щодо мінімізації забруднень поверхневих та підземних вод, низка яких стосовно басейну р. Дніпро, розглянута у даній статті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Політика Європейського Союзу щодо управління навколишнім природним середовищем (НПС), зокрема водними ресурсами, спрямована на досягнення стійкого розвитку у водогосподарській сфері серед держав-членів. У кожній європейській країні ця політика має національні особливості, які залежать від історичних аспектів розвитку державного управління, рівня економічного і соціального прогресу, екологічної ситуації, географічних характеристик території, а також від стану водних ресурсів і культурних традицій населення [5].

У Франції в 1964 р. було створено систему управління водними ресурсами, яку нині визнають однією з найефективніших у світі. Завдяки цій системі у 1980-х рр. екологічний стан річок Франції значно покращився. Сучасна водна політика Франції розвивається на основі нового водного законодавства країни.

У Великобританії для реалізації національної політики у сфері використання та охорони водних ресурсів розробляються довгострокові програми, що визначають ключові напрямки водогосподарської діяльності. Особлива увага приділяється:

- раціональному водокористуванню та водовідведенню;

- запобіганню деградації та відновленню вододойм;

- гідроекологічному контролю;

- створенню технічних засобів контролю та управління якістю води.

У Німеччині визначено мету водогосподарської політики, яка полягає у відновленні і збереженні екологічної рівноваги водних ресурсів країни. Така екологічна стратегія є важливою для забезпечення довготривалого і надійного постачання якісної води населенню та іншим споживачам.

У Норвегії високі стандарти якості води підтримуються завдяки законодавчим нормам, які захищають водоймища і водозабори від діяльності, що може спричинити забруднення. Наприклад, у місті Осло 70 % питної води надходить із озера, розташованого за 6 км від міста [6].

Хоча ЄС займає провідні позиції, відповідальність за ефективне впровадження «водних» законів покладається на держави-члени [7]. Саме національні уряди відповідають за реалізацію водогосподарської політики ЄС у своїх країнах. Це критично важлива ланка системи: навіть найкраще розроблене законодавство ЄС не буде дієвим, якщо держави-члени не зможуть його належним чином застосувати та адаптувати до своїх національних нормативних актів.

В Україні, відповідно до статті 13 Водного кодексу [8], державне управління у сфері використання, охорони вод та відновлення водних ресурсів має здійснюватися за басейновим принципом на основі міждержавних, державних і регіональних програм. На даний момент формуються лише теоретичні та методичні основи цього підходу. Також розробляються програми екологічного оздоровлення окремих річкових басейнів і створюються громадські дорадчо-консультативні басейнові ради, як-от басейнова рада Західного Бугу, яка об'єднує представників Львівської та Волинської областей [6]. Однак через відсутність належної інституційної структури і відповідного нормативно-правового забезпечення, басейновий принцип управління в Україні ще не досяг рівня розвинених країн.

Цій темі присвячена низка робіт, опублікованих в Україні. Серед них варто відзначити праці В. А. Сташука [9], спільну роботу А. В. Яцика, Ю. М. Грищенка, Л. А. Волкової та інших [10], а також дослідження В. Б. Мокіна, В. В. Гребня та їхніх колег [11]. Серед видань особливу увагу привертає монографія О. Г. Васенка та Г. А. Верніченко [12], що детально розглядає комплексне планування і управління водними ресурсами, пропонує глибокий аналіз підходів до управління водними ресурсами в різних країнах.

Серед іноземних дослідників слід відмітити наступні колективи авторів: G. Martins, A.G. Brito, R. Nogueira [13] займаються дослідженням управління водними ресурсами в південній Європі; H.R. Khan, J. Liu, S. Liu, J. Li [14] оцінюють особливості антропогенного впливу на вміст важких металів у поверхневих відкладах річкової системи басейну Бенгалії, Бангладеш; Md.M. Naque, N.M. Niloy, O.K. Nayna, K.J. Fatema [15] визначають мінливість якості води та індексу забруднення металами в річці Ганг, Бангладеш; S. Chakraborty, K. Sarkar, S. Chakraborty, A. Ojha [16] оцінюють покращення якості поверхневих вод під час пандемічного локдауну в екологічно напруженому естуарії річки Хуглі (Ганг), Західна Бенгалія, Індія; A. Bridhikitti, T. Prabamroong, G.A. Yu [17] виявляють проблеми якості поверхневих вод у басейні річки Мун, Таїланд.

Невирішена частина загальної проблеми.

Автори статті намагалися двояко охарактеризувати проблему накопичувачів неочищених СВ та шламів промислових підприємств України, оскільки, з одного боку, вони є техногенними родовищами корисних компонентів великотоннажних відходів, а з іншого – завдають серйозної шкоди всім компонентам НПС.

Мета дослідження – визначити ступінь негативного впливу накопичувачів СВ та шламів на водний басейн р. Дніпро та запропонувати заходи для покращення якості води у головному джерелі водопостачання в районі розміщення одного з найбільших металургійних комбінатів України «Запоріжсталь».

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі задачі:

- проводився моніторинг якості води у водних об'єктах басейну р. Дніпро із визначенням найпоширеніших забруднюючих речовин, у т.ч. сполук ТРМ (іони Mn, Cu, Zn, Fe, Pb), сполук азоту, фенолів;

- визначалися середньорічні концентрації полутантів у період 2011-2022 рр. під впливом промислових об'єктів, комунального, сільського господарства та ін.

Методи дослідження. В роботі використовувється методика інтегральної оцінки якості НПС для ранжування території ШН за рівнем техногенного навантаження та ступеня його впливу на окремі компоненти НПС.

Викладення основного матеріалу. Найбільш поширеними забруднюючими речовинами у водних об'єктах басейну р. Дніпро залишаються сполуки ТРМ (Cr, Mn, Cu, Zn, Fe, Pb), сполуки азоту, феноли та нафтошлами. За даними гідрохімічних спостережень за період 2011-2022 рр. загалом у річках дніпровського басейну за більшістю показників якості води суттєво не змінилася.

Середньорічні концентрації основних забруднюючих речовин перевищували ГДК, а деякі знаходилися лише на рівні високого забруднення. Середньорічні концентрації азоту амонійного та нафтопродуктів були в межах 1-4 ГДК, азоту нітритного – 1-12 ГДК, сполук Zn – 1-5 ГДК, фенолів – 1-6 ГДК, Fe – 1-7 ГДК, Cr⁺⁶ – 1-13 ГДК, Mn – 1-18 ГДК, сполук Cu – 2-23 ГДК [1-4]. Значна частина водних ємнісних споруд нині зруйнована чи пошкоджена.

Максимальний вміст сполук Mn в межах 20-61 ГДК спостерігався у воді рр. Дніпро, Случ, Остер, Удай, Псел, Сула, Хорол, Ворскла, Вовча, Інгулець та Дніпровського водосховища, сполук Cu в межах 31-59 ГДК – у воді рр. Дніпро, Устє, Случ, Десна, Сула, Кременчуцького та Кам'янського водосховищ, з'єднань Zn у межах 10-16 ГДК – у воді Київського, Кременчуцького та Кам'янського водосховищ. У рр. Самара, Вовча, Солони постійно трапляються випадки значних забруднень сульфатами [1].

Основними джерелами впливу промислових підприємств на водний басейн є скидання неочищених та умовно очищених СВ, надходження фільтратів та поверхневих стоків з території накопичувачів СВ та шламів, осадження твердої фази організованих та неорганізованих пилогазових викидів у поверхневі водні об'єкти (рис. 1). Більше 40 % накопичувачів басейну належать до особливо небезпечних.

Індикаторами забруднення НПС є хімічний склад сировини, продукції підприємств з урахуванням фону в регіоні та скидів і шламів, що утворюються. Об'єктами завданої шкоди є приземна атмосфера, земельні ділянки, водоймища в межах розсіювання забруднень у діапазоні гранично допустимих концентрацій (ГДК), природні ландшафти та ін. [18].

Важливим напрямом у дослідженні процесів ресурсозбереження та скорочення негативного впливу накопичувачів СВ та шламів на водний басейн та здоров'я людини є вивчення складу та шляхів міграції у ґрунті поверхневих стоків та фільтратів, що містять розчинні сполуки ТРМ. На рис. 2, 3 наведено принципову схему надходження в поверхневі, підземні води та ґрунти іонів ТРМ та їх вміст у ґрунті біля накопичувача СВ [1-4; 19].

Близько 50 % накопичувачів сконцентровано у південній частині басейну р. Дніпро. Це накопичувачі шламів, що втратили цілісність. Із цих накопичувачів в поверхневі і підземні води інфільтруються розчини ряду токсичних сполук [1].

Авторами статті для ШН комбінату «Запоріжсталь» розроблена принципова структурна схема мінімізації шкоди НПС від його впливу. Досліджуваний ШН комбінату «Запоріжсталь» ємні-



Рис. 1. Фактори дії накопичувача СВ на водні басейни рік України /

Fig. 1. Factors affecting the storage of natural gas on water basins of Ukraine

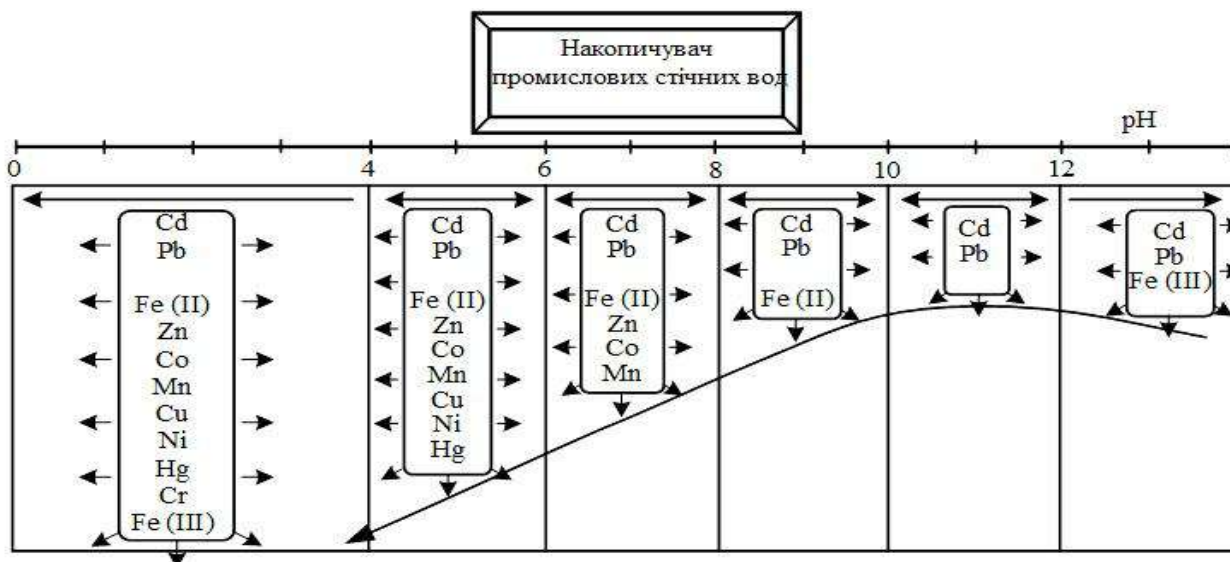


Рис. 2. Схема надходження в поверхневі та підземні води іонів ТРМ з накопичувача СВ та шламів промислового об'єкта / Fig. 2. Scheme of the entry of heavy metal ions into surface and groundwater from the wastewater and sludge storage tank of an industrial facility

стю 10,5 млн. м³ запроектований харківським «Водоканалпроектом». Скидання в нього СВ і шламів складає 1,1 млн. т/рік, термін служби – 25 років, площа ШН – 135 га, експлуатується ШН з 1958 р. У накопичувач передбачено скидання СВ та шламів:

– комбінату «Запоріжсталь» – шламів мокрих газоочисток аглофабрики, доменних, мартенівських печей, машин розливання чавуну, стоків ТЕЦ, обводненої окалини прокатних цехів, цеху виливниць, відпрацьованих емульсій та ін. [1-4; 18];
– коксохімічного заводу – шламів вуглемийки,

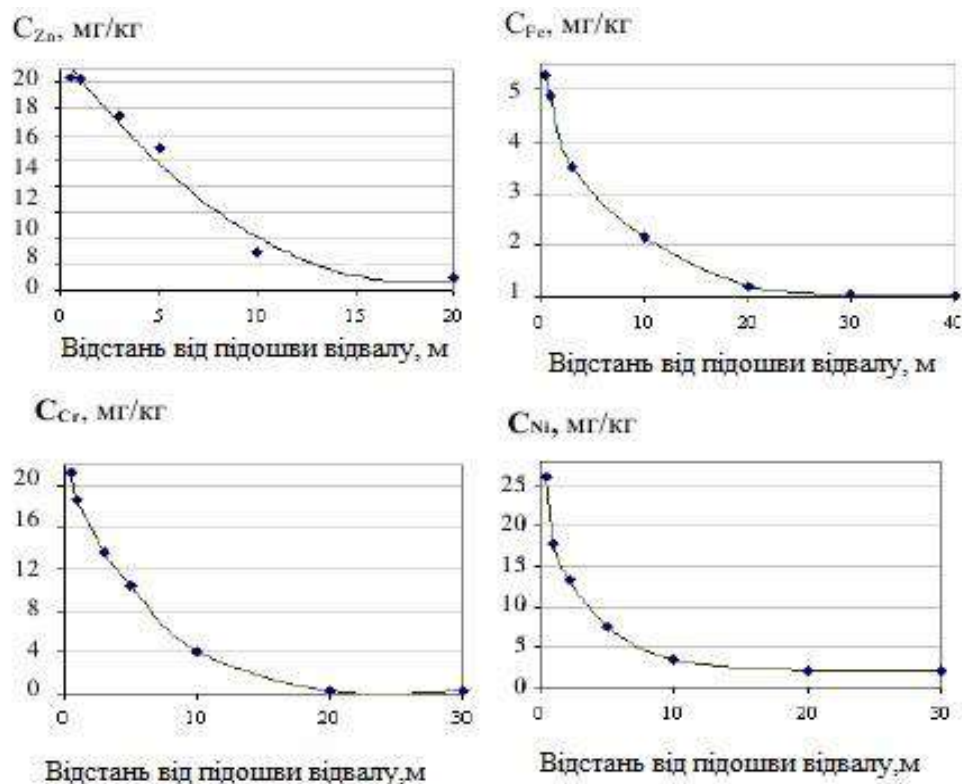


Рис. 3. Вміст важких металів у ґрунті біля накопичувачів СВ та шламів /
Fig. 3. Heavy metal content in soil near wastewater and sludge storage tanks

хімічно забруднених СВ;

- «Алюмінієвого заводу» – шламів мокрих газоочисток ТЕЦ, що працювала на твердому паливі, та шламів глиноземного виробництва;
- заводу «Дніпроспецсталь» – обводненої прокатної окалини, нейтралізованих та кислих СВ, шламів мокрих газоочисток;
- «Метизного заводу» – нейтралізованих та кислих СВ;
- заводу «Кремнійполімер» – шламів хімічного виробництва.

Враховуючи, що в системі оборотного циклу комбінату в сьогоденні умовах в середньому затримується 12 тис. т/рік окалини, за період з 1958 по 1979 рр. окалина, що міститься в СВ накопичувалася в руслі балки «Капустянка» і за 21 рік її маса склала більше 252 тис. т.

Фахівцями комбінату спільно з авторами статті виконано модернізацію газоочисного обладнання аглоцеху та гідротехнічних споруд оборотного циклу водопостачання «мокрих» газоочисток доменних печей, що дозволило значно скоротити скидання СВ у водозбірну споруду «балка Капустянка» (рис. 4).

Також авторами даної статті розроблено нову маловідходну економічно ефективну технологію утилізації замасленої окалини з отриманням збагачених ферумом брикетів або окатишів, придатних для використання в основному виробництві комбінату [1-4; 18]. Як сировину використано

представницькі проби окалини цехів комбінату «Запоріжсталь».

Принципова структурна схема мінімізації шкоди НПС від впливу ШН наведено на рис. 5.

Для запобігання забрудненню водного басейну р. Дніпро СВ та шламами із ШН комбінату «Запоріжсталь» доцільно виконати додатковий комплекс науково-дослідних та проектно-вишукувальних робіт з вивчення властивостей накопичених відкладів окалини в місцях її скидів у ШН для створення виробничого комплексу з утилізації окалини із отриманням за технологією авторів цієї статті збагачених ферумом брикетів/окатишів для використання в умовах комбінату.

Авторами статті використана методика інтегральної оцінки якості НПС для ранжування території ШН комбінату «Запоріжсталь» за рівнем техногенного навантаження та ступеня цього впливу на окремі компоненти НПС [1; 3-4; 18].

Ступінь негативного впливу підприємства на НПС визначається його розмірами. Виділяють об'єкти з низькою, середньою та високою інтенсивністю негативного впливу, яким відповідають значення коефіцієнта k_1 (табл. 1). Ступінь небезпеки накопичених речовин визначається за формулою:

$$D = 5 - (O_n - 0,25) N \quad (1)$$

де D – ступінь їхньої небезпеки; O_n – клас небезпеки найнебезпечнішого компонента; N – кількість факторів додаткової небезпеки [1-5].

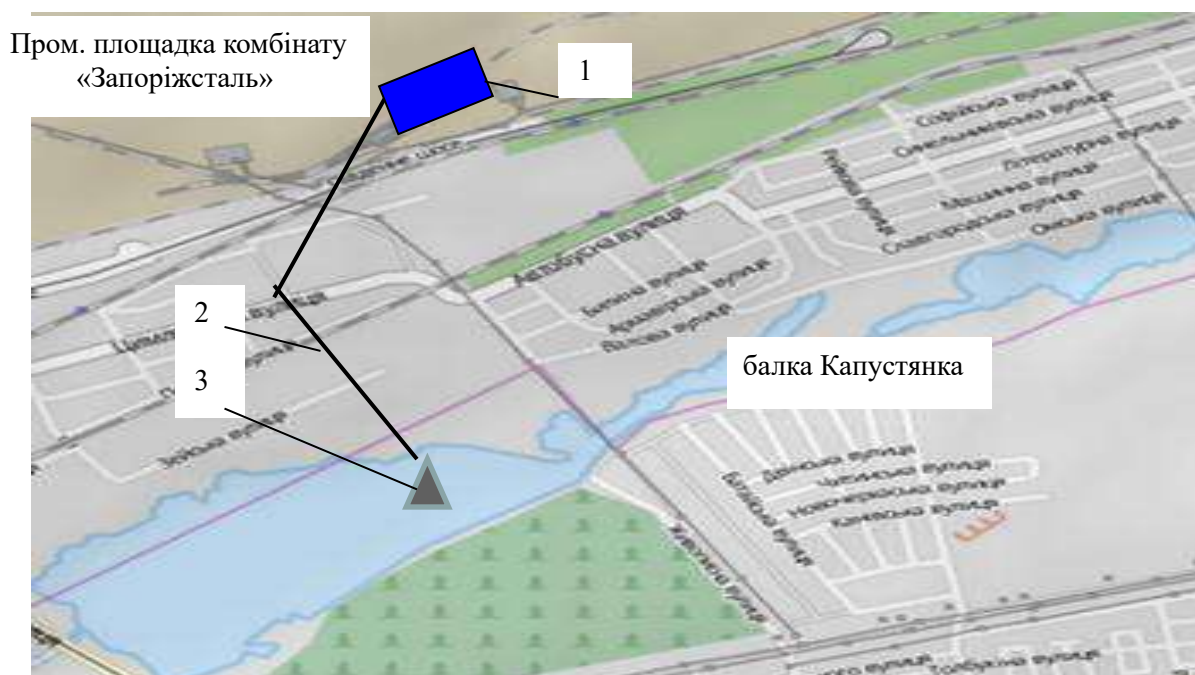


Рис. 4. Розробка шламових відкладів водозбірної споруди комбінату «Запоріжсталь» у балці «Капустянка»: 1 – оборотний цикл СВ, що містять окалину;

2 – пульпопровід $L = 1,5$ км, $D = 600$ мм; 3 – земснаряд /

Fig. 4. Development of sludge deposits of the water collection structure of the Zaporizhstal plant in the Kapustyanka beam. 1 – reversible cycle of sludge containing scale; 2 – slurry pipeline $L = 1.5$ km, $D = 600$ mm; 3 – dredger

Таблиця 1/ Table 1

Коефіцієнти інтенсивності впливу на НПС накопичувача стічних вод та шламів /
Environmental impact intensity factors of wastewater and sludge storage facilities

Коефіцієнт інтенсивності впливу об'єкта на НПС	Площа об'єкта, га	Об'єм сховища, м ³	Розмір санзони, м
Низька ($k_1=1$)	< 1	< 10 тис.	< 500
Середня ($k_1=1,5$)	1–10	10–250 тис.	500–1000
Висока ($k_1=2$)	>10	> 250 тис.	>1000

Іншим найважливішим параметром, що визначає ступінь негативної дії об'єкта на НПС є надійність споруди. При оцінці використовують коефіцієнти надійності (k_2) (табл. 2).

Наявність та оперативність системи моніторингу НПС може істотно впливати на масштаби негативного впливу об'єкта, так як від цього залежить оперативність ухвалення рішень у випадках аварійного забруднення НПС (табл. 3).

Для розрахунку показника ступеня потенційної екологічної небезпеки об'єкта (l_0) визначають похідні коефіцієнтів k_1 , k_2 , k_3 . В залежності від результату показник ступеня l_0 визначають за табл. 4.

Залежно від конструкції протифільтраційних екранів об'єкти розміщення накопичених СВ та шламів мають такі коефіцієнти технологічної захищеності підземних вод $k_{g,w}/l_{s,w}$ (табл. 5). Показник ступеня природної захищеності поверхневих вод ($l_{s,w}$) наведено у табл. 6.

Значення ступеня потенційної негативної дії накопичених промислових відходів на НПС розраховують за формулою:

$$C = D(a \text{ або } D_m) \cdot l_0 \cdot (l_a \cdot k_a + l_{g,w} \cdot k_{g,w} + l_{s,w} \cdot k_{s,w}) \quad (2)$$

де C – ступінь негативної дії накопичених скидів та шламів; D – ступінь їхньої власної небезпеки; D_m – середній ступінь власної небезпеки всіх видів скидів і шламів (використовується у разі спільного складування різних типів речовин, що скидаються); l_0 – ступінь екологічної небезпеки споруди; l_a – ступінь природної захищеності атмосфери; $l_{g,w}$ – ступінь природної захищеності підземних вод; $l_{s,w}$ – ступінь природної захищеності поверхневих вод; k_a , $k_{g,w}$, $k_{s,w}$ – коефіцієнти технологічної захищеності атмосфери, підземних та поверхневих вод відповідно [1-4].

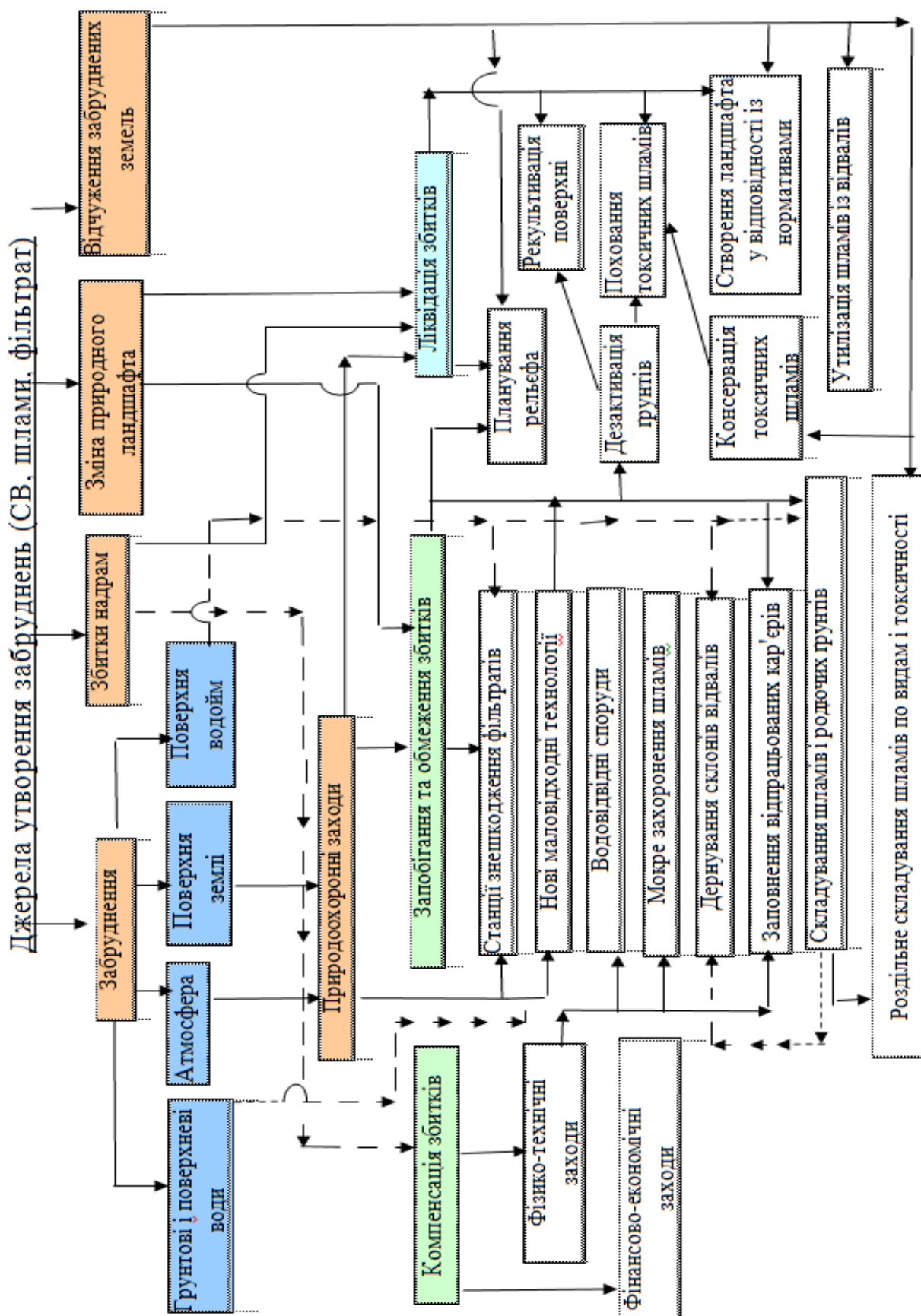


Рис. 5. Принципова структурна схема мінімізації шкоди НПС від впливу ППН /
Fig. 5. Schematic structural diagram of minimizing damage to the environment from the impact of a sludge storage tank

Таблиця 2 / Table 2

Коефіцієнти надійності об'єктів зберігання скидів / Reliability factors of discharge storage facilities

Коефіцієнт надійності об'єкта (k_2)	Коефіцієнт зносу об'єкта	Заповнення сховища, %	Строк безаварійної експлуатації
1,5	> 1	>100	<1 року
1	0,75–1	75–100	1–5 років
0,75	< 0,75	< 75	> 5 років

Таблиця 3 / Table 3

Коефіцієнти ефективності моніторингу НПС (k_3) / Environmental monitoring efficiency factors (k_3)

Коефіцієнт ефективності моніторингу (k_3)	Частота замірів якості повітря	Частота замірів якості поверхневих і підземних вод	
1,0	щодня	щомісячно	1 раз в 6 міс.
1,1	рідше	рідше	рідше
1,25	відсутні		

Таблиця 4 / Table 4

Показник ступеня потенційної екологічної небезпеки спорудження/об'єкта (l_0) /Indicator of the degree of potential environmental hazard of a structure/object (l_0)

l_0	1	2	3
Похідна коефіцієнтів k_1, k_2, k_3	< 2	2–4	> 4

Таблиця 5 / Table 5

Коефіцієнт негативного впливу об'єкта на підземні води $k_{g.w.}$ /Coefficient of negative impact of the facility on groundwater $k_{g.w.}$

$k_{g.w.}$ / ступінь	Екран	Матеріал екрана	Потужність, м
1 (дуже висока)	відсутній	–	–
0,75 (висока)	1-шаровий, тільки днище	плівка	< 0,3
0,5 (середня)	1-шаровий, днище та борта	грунт, бетон	0,3–0,8
0 (дія практично відсутня)	2-шаровий, днище та борта	асфальтобетон, бетон + плівка, грунт	> 0,8

Таблиця 6 / Table 6

Показник природної захищеності поверхневих вод ($l_{s.w.}$) / Indicator of natural protection of surface waters ($l_{s.w.}$)

Сумарний бал	3–4	5–6	7–8
$l_{s.w.}$	0,5	1,0	1,5

Таблиця 7 / Table 7

Ступінь негативного впливу СВ та шламів на НПС /

The degree of negative impact of wastewater and sludge on the environment

Ступінь	низька	середня	висока
Значення	<30	30–60	>60

Ступінь негативного впливу накопичених матеріалів на НПС визначається за табл. 7.

Наведена маса забруднювачів і зона забруднення території для джерела визначаються по [1–

4; 18]. Наведена маса j -го поллютанта у ґрунті від i -го джерела визначається за формулою:

$$M_{pi} = m_{ij} \cdot A_j \cdot S_{ij}, \quad (3)$$

де m_{ij} – річна маса j -го поллютанта на одиницю площі, що надходить з i -го джерела; A_j – екологічний показник відносної небезпеки надходження j -го поллютанту у ґрунт; S_{ij} – площа зони активного забруднення ґрунту j -м поллютантом від i -го джерела.

Аналіз всього комплексу еколого-економічних функцій показує, що існування природних об'єктів значно цінніше вигод, що отримуються від їхнього одностороннього промислового використання. Навіть без урахування екологічних та соціальних ефектів, що не підлягають економічній оцінці, визначення економічної шкоди від забруднення НПС на стадії передпроектних рішень допомагає уникнути багатьох екологічних та економічних прорахунків.

Заходи щодо компенсації завданої шкоди мають відповідати вкладенню фінансових та інших коштів. Заходи щодо ліквідації збитків визначаються характером земель, що відводяться, властивостями накопичених матеріалів і включають [20]:

- планування рельєфу з рекультивацією та використанням територій у рекреаційних цілях;
- консервацію токсичних СВ, що розміщуються, і шламів з їх обваловкою, похованням і використанням ділянок, що утворюються, у виробничо-господарських цілях;
- біологічну рекультивацію з урахуванням придатності відроджуваних земель (засипання піском, гіпсування, укладання родючого шару, ґрунтування та ін.);
- поховання токсичних шламів у спеціальних сховищах;
- утилізацію СВ і рідкої фази шламів, що складаються.

На рис. 6 наведено залежності ступеня шкоди НПС у районі розміщення накопичувачів СВ та шламонакопичувачів.

Основні заходи запобігання шкоди НПС [20]:

- розробка маловідходних технологій, зниження класу небезпеки речовин, що надходять у накопичувач СВ та шламів;

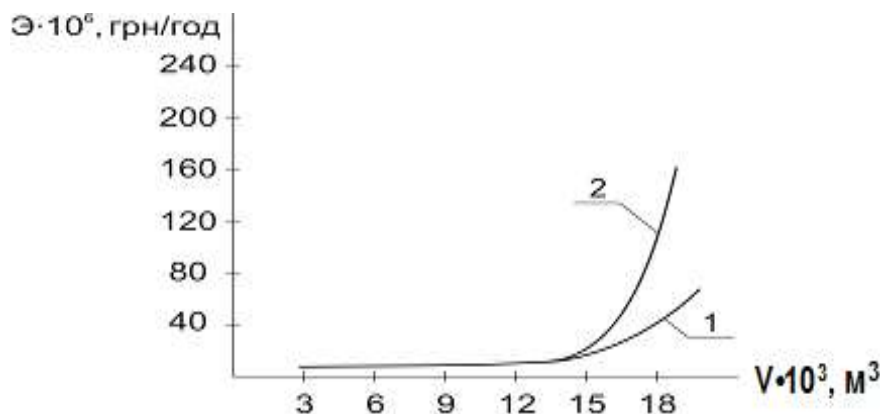


Рис. 6. Номограма для визначення шкоди НПС від впливу накопичувача СВ та шламів залежно від обсягу їх складування та класу небезпеки ($\text{КН}_п$): 1 – шлам 3 $\text{КН}_п$; 2 – шлам 1 $\text{КН}_п$.

Fig. 6. Nomogram for determining the environmental damage from the impact of a wastewater and sludge storage tank depending on the volume of their storage and hazard class (Hazard Class):

1 – sludge 3 Hazard Class; 2 – sludge 1 Hazard Class

– розробка технологічних схем відведення підвідвальних вод, їх очищення та повернення в основне виробництво;

– винесення сільгоспоб'єктів з районів впливу накопичувачів СВ.

До заходів щодо обмеження шкоди НПС входять:

– утилізація цінних компонентів із СВ та шламів, використання нейтральних твердих компонентів як закладного матеріалу та для будівництва доріг у районі їх господаря;

– відведення площ під розширення накопичувачів з урахуванням вартості землі, обсягів скидів і шламів, рельєфу місцевості, рози вітрів.

Соціально-економічні передумови вирішення проблеми включають:

– усвідомлення необхідності глибокої рефор-

ми існуючої практики природокористування на всіх етапах виробничої діяльності;

– пріоритетність екологічних імперативів у структурній перебудові економіки, розвитку науки та технологій;

– необхідність реформування та розвитку всієї правової та економічної системи регулювання природокористування.

Розмір економічної шкоди від забруднення НПС перестав бути нормативним показником. Методи його розрахунку у європейських країнах різняться за економічною складовою. Тому важко зіставити оцінки збитків, отриманих у цих країнах.

В умовах сьогодення особливого значення набуває визначення основних напрямів та масштабів зростання використання вторинних ресурсів з урахуванням комплексу еколого-економіч-

них та соціальних факторів [1-4]. Економічне забезпечення має включати розробку механізмів пільгового оподаткування та кредитування суб'єктів підприємницької діяльності при очищенні СВ та утилізації вилучених сполук ТРМ, у т.ч. положень про методи визначення ресурсоцінних компонентів, про організаційно-економічний механізм управління суб'єктами на регіональному та галузевому рівнях, про державне стимулювання заходів щодо їх використання.

Висновки. 1. Проблема запобігання шкоді НПС у районах розміщення накопичувачів неочищених СВ та шламів промислових підприємств України має двоякий характер, оскільки, з одного боку, є техногенними родовищами корисних компонентів великотоннажних відходів, а з іншого – завдають серйозної шкоди всім компонентам НПС.

2. Доцільність інвестицій в утилізацію цінних компонентів зі складу СВ і шламів, що скидаються, характеризується великим економічним ефектом і малим терміном окупності створюваних виробничих об'єктів.

3. Для запобігання забрудненню водного басейну річок стічними водами промислових об'єктів, шламами і фільтратами ШН у балці «Капустянка» доцільно виконати комплекс додаткових науково-дослідних і проектно-вишукувальних робіт з вивчення властивостей накопичених відкладень окалини в районах її скидів для створення виробничого комплексу з утилізації в основному виробництві комбінату «Запоріжсталь».

4. Наведені у статті дані можуть бути корисними для прогнозу наслідків впливу на НПС з боку накопичувачів СВ, хвостосховищ і відвалів великотоннажних відходів на інших об'єктах.

Список використаних джерел

1. Kasimov, A., Stalinska, I., & Sorokina, K. (2017). Assessment of the pollution degree of the dnepir river and development of measures for its decrease. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(10 (87)), 41–49. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.101388>
2. Семиноженко, В.П., Касимов, А.М. (2011). *Промышленные отходы: проблемы и решения*. Харьков: Индустрия.
3. Касимов, А.М., Гуренко, И.В., Мацевитая, И.Н. (2013). Экологические и экономические инструменты сокращения ущерба окружающей среде со стороны накопителей промышленных отходов. *Экология и промышленность*, 1. 79–83.
4. Сборник удельных показателей образования отходов производства и потребления (1999). Госкомэкология.
5. Shaofeng, Jia, Aifeng, Liu, Wenbin, Zhu, Gojenko Integrated, Boris (2024). River Basin Management (IRBM). *Water Resources in the Lancang-Mekong River Basin: Impact of Climate Change and Human Interventions*, 283–325. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-97-0759-1_8
6. Хільчевський, В.К., Забокрицька, М.Р., Кравчинський, Р.Л., Чунарьов, О.В. (2015). *Основні засади управління якістю водних ресурсів та їхня охорона*. К: ВПЦ «Київський університет».
7. Водна Рамкова Директива ЄС 2000/60/ЄС (2006). *Основні терміни та їх визначення*, Київ.
8. Водний кодекс України (Закон України). № 213/95-ВР (1995). Вилучено з <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/213/95>.
9. Сташук, В.А., Мокін, В.Б., Гребінь, В.В. (2014). *Наукові засади раціонального використання водних ресурсів України за басейновим принципом*. Херсон.
10. Яцик, А.В., Грищенко, Ю.М., Волкова, Л.А., Пашенюк, І.А. (2007). *Водні ресурси: використання, охорона, відтворення, управління*. К: Генеза.
11. Гребінь, В.В., Мокін, В.Б., Хільчевський, В.К. (2013). *Методики гідрографічного та водогосподарського районування території України відповідно до вимог Водної рамкової директиви Європейського Союзу*. К: Інтерпрес.
12. Васенко, О.Г., Верніченко, Г.А. (2001). *Комплексне планування та управління водними ресурсами*. К: Ін-т географії НАН України.
13. Martins, G., Brito, A.G., Nogueira, R., Ureña, M., Fernández, D., Luque, F.J., Alcácer C. (2013). Water resources management in southern Europe: Clues for a research and innovation based regional hypercluster. *Journal of Environmental Management*, 119. 76–84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.01.0272>.
14. Khan, M.H.R., Liu, J., Liu, S., Li, J., Cao, L., Rahman, A. (2020). Environ Anthropogenic effect on heavy metal contents in surface sediments of the Bengal Basin river system, Bangladesh. *Sci. Pollut. Res. Int.*, 27(16). 19688–19702. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08470-4>
15. Haque, Md. M., Niloy, N.M., Nayna, O.K., Fatema, K.J., Quraishi, S.B., Park, J.H., Kim, K.W. (2020). Variability of water quality and metal pollution index in the Ganges River, Bangladesh. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, 27(34). 42582–42599. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10060-3>
16. Chakraborty, S., Sarkar, K., Chakraborty, S., Ojha, A., Banik, A., Chatterjee A. (2021). Assessment of the surface water quality improvement during pandemic lockdown in ecologically stressed Hooghly River (Ganges) Estuary, West Bengal, India. *Mar. Pollut. Bull.*, 171. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112711>
17. Bridhikitti, A., Prabamroong Sustain, T., Yu, G.A. (2020). Problem identification on surface water quality in the Mun River Basin, Thailand. *Water Resour. Manag.*, 6 (4) DOI: <https://doi.org/10.1007/s40899-020-00413-8>
18. Касимов, А.М., Товажнянский, Л.Л., Тошинский, В.И., Сталинский, Д.В. (2009). *Управление опасными промышленными отходами. Современные проблемы*. А. М. Касимов (ред.). Х., Изд. Дом НТУ «ХПИ».

19. Касимов А.М. (2013). Миграция ионов тяжелых и редких металлов в почвах вокруг золошлаковых отвалов ряда угольных ТЭС Украины. *Mater. IX Mezinárodní vědecko-praktická Konference «Vědecký Promysl Evropského kontinentu-2013. 27.11.2013-05.12/2013»*. Díl. 33 Technické vědy. Praha. Publishing House «Education and Science».s.r.o.
20. Касимов, А.М. (2011). Основные мероприятия по ликвидации ущерба окружающей природной среде в районе размещения накопителей отходов металлургических заводов. *Черная металлургия: Бюллетень института «Черметинформация», Вып. 12 (1344). 70-72.*

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Assessment of the degree of pollution of the middle reaches of the Dnipro River and development of measures to minimize it

Oleksandr Kasimov¹

DSc (Technical), Professor, Head of the Scientific and Technical Department

¹ State Enterprise "Ukrainian Coal Chemical Institute", Kharkiv, Ukraine;

Igor Udalov²

DSc (Geology), Professor, Department of Fundamental and Applied Geology,

² V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine;

Alina Kononenko²

PhD (Geology), Associate Professor of the Department of Fundamental and Applied Geology

ABSTRACT

Problems Statement and Purpose. Ukraine is currently facing technical and ecological and hygienic challenges to minimize pollution of surface and groundwater, a number of which, in relation to the Dnipro River basin, are discussed in this article. The authors of the article tried to characterize the problem of untreated wastewater and sludge reservoirs of industrial enterprises of Ukraine in two ways, since, on the one hand, they are man-made deposits of useful components of large-tonnage waste, and on the other hand, they cause serious harm to all components of the environment. The purpose of the study is to determine the degree of negative impact of wastewater and sludge storage tanks on the Dnipro River basin and to propose measures to improve water quality in the main source of water supply in the area where one of the largest metallurgical plants in Ukraine, Zaporizhstal, is located.

Materials and Methods of Research. The work uses the methodology of integrated assessment of environmental quality to rank the territory of the sludge storage facility by the level of technogenic load and the degree of its impact on individual components of the environment.

Results. The article assesses the impact of industrial wastewater and sludge storage tanks on the state of the Dnieper River water basin. Water quality monitoring was carried out in water bodies of the Dnipro River basin with the determination of the most common pollutants, including compounds of technogenic metal deposits (Mn, Cu, Zn, Fe, Pb ions), nitrogen compounds, and phenols. A schematic diagram of the entry of toxic compounds of heavy and rare metals from technogenic deposits into surface, groundwater and soil and their content in the soil near the wastewater and sludge storage tank is presented. A basic structural diagram has been developed for the sludge storage tank of the Zaporizhstal plant to minimize damage to the environment from its impact. The methodology of integrated assessment of environmental quality was used to rank the territory of the sludge storage facility of the Zaporizhstal plant by the level of technogenic load and the degree of this impact on individual components of the environment. The main measures for preventing and limiting damage to the environment are presented.

Conclusions. 1. The problem of preventing damage to the environment in areas where untreated wastewater and sludge storage facilities of industrial enterprises of Ukraine are located is twofold: on the one hand, they are man-made deposits of useful components of large-tonnage waste, and on the other hand, they cause serious damage to all components of the natural environment. 2. The feasibility of investments in the utilization of valuable components from the composition of discharged wastewater and sludge is characterized by a large economic effect and a short payback period for the created production facilities. 4. The data provided by the statistics may be useful for forecasting the influx of excess wastewater into the natural medium from the side of accumulative wastewater, tailings and dumps of large-tonnage waste at other facilities.

Keywords: water basin protection, wastewater treatment, metallurgical plant, sludge storage tank, heavy and rare metals, filtrate, groundwater and surface water, sludge disposal, damage to the environment.

References

1. Kasimov A., Stalinska I., Sorokina, K. (2017). Assessment of the pollution degree of the dnep river and development of measures for its decrease. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(10(87), 41–49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.101388>

2. Seminozhenko, V.P. Kasimov, A.M. (2011). *Industrial waste: problems and solutions*. Kharkiv: Industry. [in Russian]
3. Kasimov, A.M., Gurenko, I.V., Matsevitaya I.N. (2013). *Ecological and economic tools for reducing the damage to the environment from the side of industrial waste collectors*. Ecology and industry, 1, 79-83.
4. *Collection of specific indicators of production and consumption waste generation (1999)*. M.: State Committee for Ecology.
5. Shaofeng, Jia, Aifeng, Lyu, Wenbin, Zhu, GojenkoIntegrated, Boris (2024). *River Basin Management (IRBM). Water Resources in the Lancang-Mekong River Basin: Impact of Climate Change and Human Interventions*, 283-325. https://doi.org/10.1007/978-981-97-0759-1_8
6. Khilchevsky, V. K., Zabokrytska, M. R., Kravchinsky, R. L., Chunar'yov, O. V. (2015). *Basic principles of water resources quality management and their protection: a manual*. K.: VPC "Kyiv University". [in Ukrainian]
7. *EU Water Framework Directive 2000/60/EC (2006)*. Key terms and their definitions, Kyiv. [in Ukrainian]
8. *Water Code of Ukraine (Law of Ukraine)*. No. 213/95-BP (1995). Retrieved from <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/213/95> [in Ukrainian]
9. Stashuk, V. A., Mokin, V. B., Hrebin, V. V. (2014). *Scientific principles of rational use of water resources of Ukraine according to the basin principle*. Kherson. [in Ukrainian]
10. Yatsyk, A. V., Grishchenko, Yu. M., Volkova, L. A., Pashenyuk I. A. (2007). *Water resources: use, protection, reproduction, management*. Kyiv: Geneza. [in Ukrainian]
11. Hrebin, V. V., Mokin, V. B., Khilchevskyi, V. K. (2013). *Methods of hydrographic and water management zoning of the territory of Ukraine in accordance with the requirements of the Water Framework Directive of the European Union*. Kyiv: Interpress. [in Ukrainian]
12. Vasenko, O. G., Vernichenko, G. A. (2001). *Integrated planning and management of water resources*. Kyiv: Institute of Geography of the National Academy of Sciences of Ukraine. [in Ukrainian]
13. Martins, G., Brito, A.G., Nogueira, R., Ureña, M., Fernández, D., Luque, F.J., Alcácer C. (2013). *Water resources management in southern Europe: Clues for a research and innovation based regional hypercluster*. Journal of Environmental Management, 119, 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.01.0272>
14. Khan, M.H.R., Liu, J., Liu, S., Li, J., Cao, L., Rahman, A. (2020). *Environ Anthropogenic effect on heavy metal contents in surface sediments of the Bengal Basin river system, Bangladesh*. Sci. Pollut. Res. Int., 27(16). 19688-19702. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08470-4>
15. Haque, Md. M., Niloy, N.M., Nayna, O.K., Fatema, K.J., Quraishi, S.B., Park, J.H., Kim, K.W. (2020). *Variability of water quality and metal pollution index in the Ganges River, Bangladesh*. Environ. Sci. Pollut. Res. Int., 27(34). 42582-42599. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10060-3>
16. Chakraborty, S., Sarkar, K., Chakraborty, S., Ojha, A., Banik, A., Chatterjee A. (2021). *Assessment of the surface water quality improvement during pandemic lockdown in ecologically stressed Hooghly River (Ganges) Estuary, West Bengal, India*. Mar. Pollut. Bull., 171. 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112711>
17. Bridhikitti, A., Prabamroong Sustain, T., Yu, G.A. (2020). *Problem identification on surface water quality in the Mun River Basin, Thailand*. Water Resour. Manag., 6 (4) <https://doi.org/10.1007/s40899-020-00413-8>.
18. Kasimov, A.M., Tovazhnyansky, L.L., Toshinsky, V.I., Stalinsky, D.V. (2009). *Hazardous Industrial Waste Management. Current Issues*. A. M. Kasimov (ed.). Kh.: Publ. House of NTU "KhPI".
19. Kasimov, A.M. (2013). *Migration of ions of heavy and rare metals in soils around ash and slag dumps of some coal-fired thermal power plants in Ukraine*. Materials of the IX Mezinárodní vědecko-paktická Konference «Vědecký Promysl Evropského kontinentu. Díl. 33rd Technical Conference. Prague. Publishing House «Education and Science».s.r.o., 75-81.
20. Kasimov, A.M. (2011). *Main measures to eliminate damage to the environment in the area of waste storage facilities of metallurgical plants*. Ferrous metallurgy: Bulletin. of the Institute "Chermetinformatsiya", 12 (1344). 70-72.

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 24 March 2025

Accepted 25 April 2025

Екологічна оцінка якості поверхневих вод річки Західний Буг у межах прикордоння України та Польщі

Іван Ковальчук¹

д. геогр. н., професор, зав. кафедри геодезії та картографії,

¹ Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна,

e-mail: kovalchukip@nubip.edu.ua,  <https://orcid.org/0000-0002-2164-1259>;

Ольга Караїм²

к. екон. н., доцент, кафедра екології та охорони навколишнього середовища,

² Волинський національний університет імені Лесі Українки, Луцьк, Україна,

e-mail: olha.karaim@vnu.edu.ua,  <https://orcid.org/0000-0002-1722-4110>;

Олена Джам²

к. хім. н., доцент, кафедра екології та охорони навколишнього середовища,

e-mail: dzham.olena@vnu.edu.ua,  <https://orcid.org/0000-0003-2222-3734>;

Зоряна Лавринюк²

к. хім. н., доцент, кафедра екології та охорони навколишнього середовища,

e-mail: lavrynyuk.zoryana@vnu.edu.ua,  <https://orcid.org/0000-0002-1906-3330>;

Володимир Караїм²

здобувач ступеня доктора філософії,

e-mail: karaim.volodymyr@vnu.edu.ua,  <https://orcid.org/0000-0003-4053-8019>

Екологічні проблеми не обмежуються державними кордонами, це стосується, зокрема, транскордонних річок. Внаслідок інтенсивного антропогенного впливу на поверхневі води зазнає змін їх якісний стан, що в свою чергу потребує вирішення як на національному, так і на міжнародному рівнях. Метою дослідження є здійснення екологічної оцінки якості поверхневих вод річки Західний Буг у межах прикордоння України та Польщі. У дослідженні використовувалися методи: узагальнення та систематизації, аналізу та синтезу, порівняльний, абстрактно-логічний, послідовний. Здійснено аналіз вмісту основних забруднюючих речовин у трьох пунктах спостереження транскордонної ділянки р. Західний Буг (1 – с. Забужжя, 2 – м. Устилуг, 3 – с. Амбуків) упродовж 2021–2023 рр. Визначено, що концентрація більшості забруднюючих речовин у поверхневих водах знаходилася в межах норми. Окремі перевищення показників стосувалися завислих речовин та фосфатів. На початку досліджуваного періоду зафіксовано перевищення ГДК амонію. Вміст нітритів характеризується допустимими значеннями. Щодо стосується забруднення компонентами сольового складу, то з березня 2021 р. й до лютого 2022 р. поверхневі води річки біля с. Забужжя мали клас та категорію якості за станом – «задовільні», за ступенем чистоти – «чисті» та «досить чисті». Далі до вересня 2023 р. їх стан покращився до рівня «добрі» у всіх категоріях. У с. Амбуків та в м. Устилуг клас якості води за станом визначено як «добрі», категорія якості – відповідно «добрі» та «дуже добрі», за ступенем чистоти – «чисті» та «досить чисті». За індексом трофо-сапробіологічних показників у всіх створах клас і категорія якості за станом оцінено як «задовільні», за ступенем чистоти – «забруднені» та «слабко забруднені». Щодо індексу специфічних показників токсичної дії – спостерігаємо високий рівень якості: клас за станом – «добрі», категорія – «дуже добрі», за ступенем чистоти – «чисті». Розрахований комплексний екологічний показник свідчить, що поверхневі води р. Західний Буг впродовж 2021–2023 рр. мають клас якості – «добрі», категорію якості – «добрі»; клас якості за ступенем чистоти – «чисті», категорія якості за ступенем чистоти – «досить чисті». Основна причина цього стану – зниження антропогенного навантаження на річку та її басейн. Дослідження показало, що стан поверхневих вод р. Західний Буг упродовж 2021–2023 рр. у більшості випадків відповідає нормативним показникам якості. За комплексним екологічним індексом води у трьох створах характеризуються як «добрі» та «чисті».

Ключові слова: транскордонна річка, Західний Буг, поверхневі води, оцінка якості води, моніторинг, екологічний контроль, екологічний стан, забруднюючі речовини, управління водними ресурсами.

Як цитувати: Ковальчук Іван, Караїм Ольга, Джам Олена, Лавринюк Зоряна, Караїм Володимир (2025). Екологічна оцінка якості поверхневих вод річки Західний Буг у межах прикордоння України та Польщі. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (62), 424–436. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-32>

In cites: Kovalchuk Ivan, Karaim Olha, Dzhama Olena, Lavrynyuk Zoryana, Karaim Volodymyr (2025). Ecological Assessment of Surface Water Quality of the Western Bug River in the Border Region of Ukraine and Poland. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (62), 424–436. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-32> [in Ukrainian]

Вступ. Екологічні проблеми, які виникають на прикордонних територіях внаслідок забруднення водних об'єктів, є однією із ключових екологічних загроз сучасності. Інтенсивна сільськогосподарська діяльність, урбанізація, промислове забруднення та недостатньо ефективна система очищення стічних вод у прикордонних регіонах

можуть сприяти деградації водних екосистем.

Вирішення цього питання є важливим як на національному рівні, так і на міжнародному, оскільки стосується узгодження інтересів суміжних країн, адже транскордонні водотоки потребують спільного моніторингу водних об'єктів і координації управлінських водоохоронних рішень. Сві-

товий досвід, зокрема рекомендації Європейської економічної комісії ООН, підкреслюють важливість впровадження комплексних підходів до управління водними ресурсами. Рамкова водна директива Європейського Союзу визначає необхідність досягнення «доброго екологічного стану» поверхневих вод та координації дій між країнами [16]. Дослідження стану річки Західний Буг є актуальним як для України, так і для сусідніх держав, зокрема Республіки Польща, оскільки води річки є важливим природним ресурсом для населення цих країн. Через ці обставини актуальність теми дослідження зумовлена необхідністю визначення показників якісного стану поверхневих вод з метою зниження ризиків екологічних катастроф, покращення управління водними ресурсами, а також забезпечення сталого розвитку водного господарства прикордонних територій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Екологічні аспекти якості поверхневих вод активно досліджуються як вітчизняними, так і зарубіжними науковцями. Так, комплексний екологічний та гідрохімічний аналіз стану річок природного заповідника «Древлянський» з метою оптимізації природоохоронних заходів, моніторингу й оцінювання екобезпеки здійснено Коніщуком В., Шумигай І., Мартиненко В. [4]. Особливості забруднення річок басейну Дону біогенними компонентами досліджено Ухань О., Осадчою Н. [12]. Екологічний стан русла р. Прип'ять за макрофітовим індексом визначено Некос А., Боярин М., Цьось О., Нетробчук І., Волошиним В. [7]. Оцінку екологічного стану води рекреаційних озер Волині проведено Фесюком В., Ільїним Л., Мороз І., Ільїною О. [13]. Оцінку якості поверхневих вод р. Західний Буг щодо вмісту сполук нітрогену здійснили Лисиця А., Лико Д., Портухай О., Логвиненко І., Лико С. [5]. Забруднення поверхневих вод р. Західний Буг на транскордонній ділянці України у 2014–2018 роках оцінили Гопчак І., Калько А., Басюк Т., Пінчук О., Герасимов І., Яроменко О., Шкіринець В. [17]. Моніторинг якості поверхневих вод басейну р. Західний Буг у межах Львівської області виконали Одноріг З., Манько Р., Мальований М., Соловій К. [19]. Висвітленню екологічного стану річкових басейнів Західного Полісся України присвячена праця Басюк Т., Гопчака І., Яцика А. [14]. Гідроекологічний моніторинг забруднення важкими металами водою басейну р. Західний Буг в межах гірничопромислового району здійснили Попович В., Скробала В., Тиндик О., Каспрук О. [20].

Теоретичні та практичні аспекти управління транскордонними водними ресурсами басейну р. Західний Буг розкрито Павліхою Н., Яков'юком В., Цимбалюк І. [8]. Особливості водогосподарського та водоохоронного управління на прикладі

басейну р. Західний Буг висвітлено Ковальчуком І. [3]. Результати досліджень якості поверхневих вод малих річок, а також оцінку антропогенного впливу на них в аспекті екологічного управління представлено Караїм О., Бедунковою О., Лавринюк З., Джам О. [2].

Значний внесок у дослідження екологічного стану водних об'єктів зроблено закордонними науковцями, зокрема просторово-часові зміни забруднення води, їх джерела та наслідки для р. Буг у Республіці Польща досліджено Grzywna A., Bronowicka-Mielniczuk U., Połec K. [18]. Оцінку якості поверхневих вод р. Південний Буг за комплексними показниками досліджено Shakhman I., Bystriantseva A. [21]. Наявність забруднюючих речовин, у пробах води з нижньої частини басейну р. Дунай дослідили Đurišić-Mladenović, N., Živančev, J., Antić, I., Rakić, D., Buljović, M., Pajin, B., Llorca, M., & Farre, M. [15].

Виконаний стислий огляд напрямів і результатів досліджень екологічного стану поверхневих вод річок свідчить про важливість цієї проблеми, особливо у зв'язку зі змінами клімату, зростанням дефіциту водних ресурсів і погіршенням їх якості.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Попри наявність досліджень екологічного стану річок в різних регіонах, залишаються аспекти, які потребують подальшого вивчення. Зокрема, недостатньо висвітлено динаміку змін вмісту основних забруднюючих речовин у поверхневих водах транскордонної ділянки річки Західний Буг з урахуванням сезонних коливань стоку під впливом змін клімату та антропогенного навантаження. Потребують розвитку підходи до оцінювання якості води, важливим є питання удосконалення методології моніторингу, яке дозволило б оперативно реагувати на зміни у стані водних ресурсів і враховувати специфіку транскордонного басейну. Таким чином, у перспективі дослідження повинні спрямовуватись на виявлення тенденцій змін якості поверхневих вод річки Західний Буг, розробку ефективних управлінських рішень для мінімізації впливу на них забруднень та забезпечення сталого водокористування.

Метою статті є здійснення екологічної оцінки якості поверхневих вод річки Західний Буг у межах прикордоння України та Польщі.

Матеріали та методи. У роботі використовувалися методи: систематизації та узагальнення інформації, отриманої в ході виконання досліджень; аналізу й синтезу – при аналізі показників стану поверхневих вод; порівняльно-географічний – при дослідженні змін параметрів якості води в річці під впливом різних чинників, абстрактно-логічний – при узагальненні результатів досліджень. У сучасних умовах проблеми комплекс-

ної оцінки якості поверхневих вод набувають особливого значення та є одними із головних передумов водоохоронної діяльності [16]. Дослідження здійснено на основі аналізу основних гідрохімічних показників якості води, представлених Басейновим управлінням водних ресурсів річок Західного Бугу та Сяну [1] та Регіональним офісом водних ресурсів у Волинській області [9] з використанням методики екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями [11] у трьох пунктах спостереження на р. Західний Буг (1 – у с. Забужжя; 2 – у м. Устилуг, на 500 м нижче впадіння р. Луга; 3 – у с. Амбуків, на 500 м нижче впадіння р. Хучва) впродовж 2021–2023 рр.

Для визначення відповідності якості води річки нормативним показникам використано ГДК забруднюючих речовин для вод рибогосподарського використання [7].

Екологічна оцінка якості річкових вод базувалася на аналізі середніх величин показників трьох блоків, таких як: індекс забруднення води компонентами сольового складу (I_1); індекс трофо-сапробіологічних (еколого-санітарних) показників (I_2); індекс вмісту специфічних речовин токсичної дії (I_3). Інтегральний екологічний індекс (I_e) обчислювався як середнє з суми осеред-

нених показників трьох блокових індексів [11].

У дослідженні якості річкової води до сольового блоку (I_1) включено сульфати, хлориди та мінералізацію води. Трофо-сапробіологічний (еколого-санітарний) блок (I_2) містив завислі речовини, азот амонійний, нітрати й нітроти, фосфати, БСК₅, розчинений кисень. У блоці специфічних показників токсичної дії (I_3) враховано: марганець, мідь та залізо загальне.

Інтегральний екологічний індекс якості води та блокові індекси розраховуються окремо для середніх і найгірших значень категорій. Цей метод дозволяє порівнювати якість води як на окремих ділянках одного водного об'єкта, так і між водними об'єктами різних регіонів. Він базується на розрахунку інтегрального індексу якості води, що сприяє більш точній та деталізованій оцінці її стану. Усі розраховані показники якості води поділяються на п'ять класів і сім категорій, кожна з яких має визначену назву, відображає відповідний стан води та рівень її забруднення (табл. 1) [11].

У статті представлено тренди змін окремих показників, які демонструють загальні тенденції трансформування стану річки, а також подано рівняння тренду та коефіцієнти детермінації.

Таблиця 1 / Table 1

Класи та категорії поверхневих вод за екологічною класифікацією /
Classes and categories of inland surface waters according to ecological classification *, **

Клас якості вод	I	II		III		IV	V
Категорія якості вод	1	2	3	4	5	6	7
Назва класів і категорій якості вод за їх станом	Відмінні (В)	Добрі (Д)		Задовільні (З)		Погані (П)	Дуже погані (ДП)
	Відмінні (В)	Дуже добрі (ДД)	Добрі (Д)	Задовільні (З)	Посередні (Пс)	Погані (П)	Дуже погані (ДП)
Назва класів і категорій якості вод за ступенем їх чистоти (забрудненості)	Дуже чисті (ДЧ)	Чисті (Ч)		Забруднені (Зб)		Брудні (Б)	Дуже брудні (ДБ)
	Дуже чисті (ДжЧ)	Чисті (Ч)	Досить чисті (ДЧ)	Слабко забруднені (СЗ)	Помірно забруднені (ПЗ)	Брудні (Б)	Дуже брудні (ДБ)

*Джерело: [11].

**У дужках подано аббревіатуру назв класів та категорій використану у табл. 2–4.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Річка Західний Буг є важливим транскордонним водотоком (рис. 1, за даними Держводагентства), який відіграє значну роль у забезпеченні водними ресурсами прикордонних регіонів України та Польщі. У цьому контексті, ефективне басейнове управління є одним з основних чинників забезпечення сталого водокористування. А його реалізація, у свою чергу, потребує врахування оцінки екологічного стану річки [2; 3; 8].

У дослідженні здійснено аналіз показників якості поверхневих вод у трьох пунктах спостереження р. Західний Буг на кордоні з Республікою Польща (1 – с. Забужжя, 2 – м. Устилуг, 3 – с. Амбуків (рис. 1)) впродовж 2021–2023 рр.

Одним з основних показників, які відображають якість води, є вміст завислих речовин (ГДК 25,0 мг/дм³) [6; 10]. У 2021–2023 рр. на досліджуваній ділянці зафіксовано одноразове значне їх перевищення у червні 2023 р., спричинене зливо-



Рис. 1. Географічне розташування досліджуваного об'єкта – р. Західний Буг /
Fig. 1. Geographical Location of the Study Object – the Western Bug River

вими дощами: у пункті 1 – в 3,4 рази, у пункті 2 – в 1,4 рази, у пункті 3 – в 2,8 рази. В інші періоди концентрація не перевищувала норми і залишалася в межах 9,29–20,04 мг/дм³.

За результатами дослідження вмісту амонію сольового у поверхневих водах річки встановле-

но, що з 2021 р. до лютого 2022 р. його концентрація перевищувала норму у 1,2–3,4 рази у пунктах 1 та 3. Однак, впродовж 2021–2023 рр. виявлено тенденцію до зменшення цього показника (рис. 2).

Трендові лінії демонструють загальну тенде-

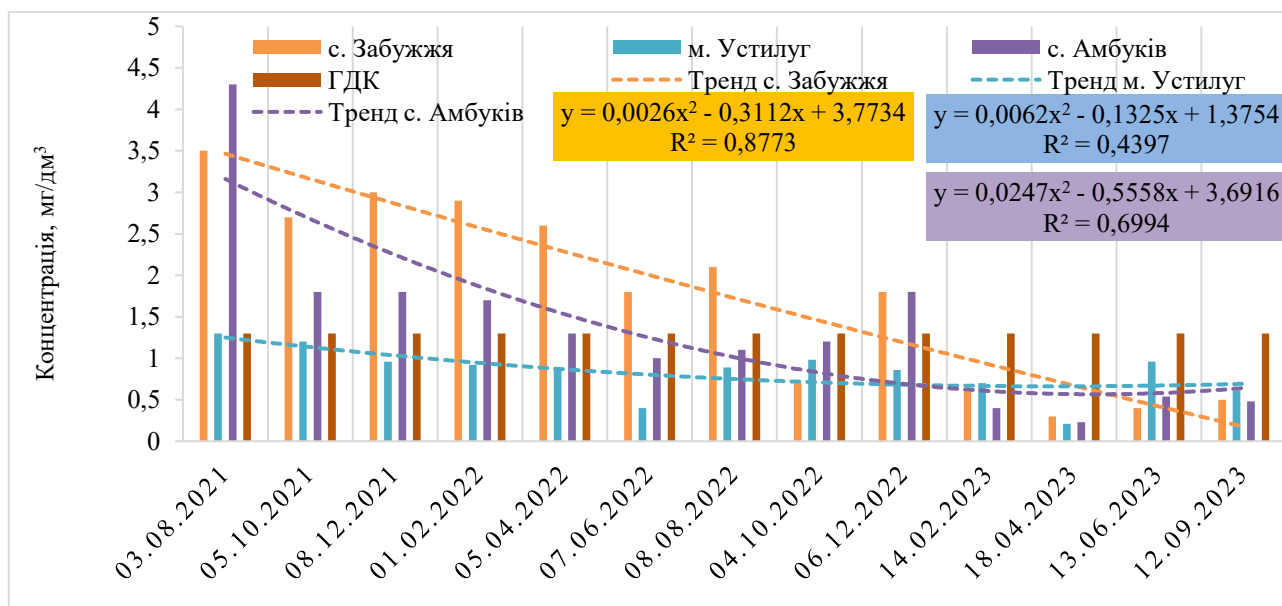


Рис. 2. Тренд концентрації амонію сольового у водах р. Західний Буг /
Fig. 2. Trend of ammonium salt concentration in the waters of the Western Bug River

нцію до зниження концентрації амонію сольового у трьох пунктах спостереження. Найвища узгодженість даних із трендом спостерігається у с. Забужжя ($R^2 = 0,8773$), що свідчить про стабільний спад забруднення. У с. Амбуків і м. Устилуґ концентрації зменшуються, хоч у цих створах можливі коливання рівнів забруднюючих речовин. Загалом, відображення трендовими лініями позитивної динаміки зменшення забруднення свідчить про зниження антропогенного навантаження.

Аналіз динаміки вмісту нітратів у водах річки показав, що їх значення були на рівні, не вищому ГДК (40 мг/дм^3) та коливалися в межах $4,2\text{--}20,38 \text{ мг/дм}^3$.

Щодо вмісту нітритів, то в 2021–2023 рр. їх значення були зафіксовані на рівні ГДК, окрім значних окремих перевищень у серпні 2021 р. – $0,87 \text{ мг/дм}^3$, червні 2023 р. – $0,4 \text{ мг/дм}^3$ в гідростворі с. Амбуків; у жовтні 2022 р. – $0,44 \text{ мг/дм}^3$ поблизу с. Забужжя, які можуть бути пов'язані із потраплянням у річку недостатньо очищених стіч-

них вод, зливом агрохімікатів із сільськогосподарських угідь після опадів, а також інтенсифікацією біохімічних процесів розкладу органічних речовин у воді.

Концентрація фосфатів у воді р. Західний Буг упродовж досліджуваного відтинку часу не перевищувала значення ГДК ($2,14 \text{ мг/дм}^3$), окрім одичного випадку в серпні 2022 року – $3,85 \text{ мг/дм}^3$ у створі с. Амбуків. Рівень концентрації хлоридів не перевищував ГДК (300 мг/дм^3) і становив $25,65\text{--}105,06 \text{ мг/дм}^3$.

Впродовж усього періоду спостерігалось незначне перевищення ГДК (100 мг/дм^3) за вмістом сульфатів, з підвищенням у серпні 2021 року (рис. 3), ймовірно через скиди недостатньо очищених стічних вод. Трендові лінії вказують на покращення якості води, проте низькі коефіцієнти детермінації в м. Устилуґ і с. Амбуків свідчать про локальні коливання, які потребують подальшого вивчення для ефективного управління водними ресурсами.

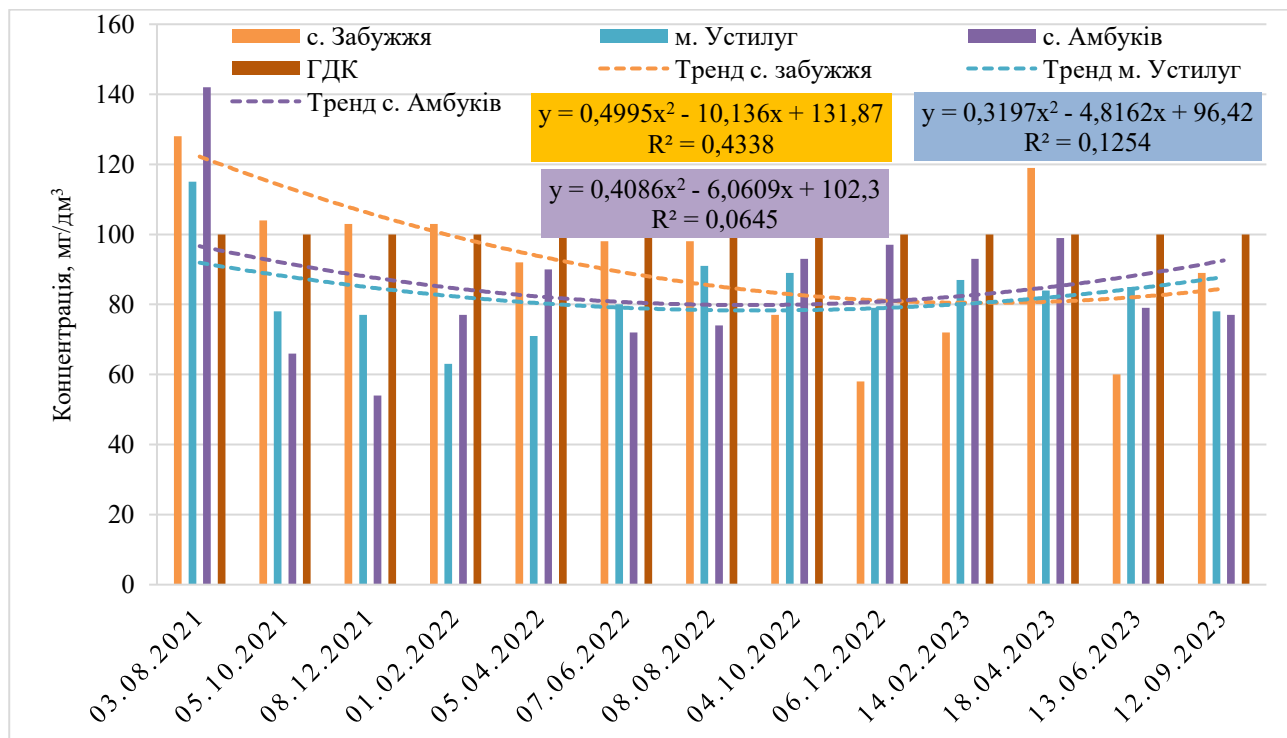


Рис. 3. Тренд концентрації сульфатів у р. Західний Буг /
Fig. 3. Trend of sulfate concentration in the Western Bug River

Визначені значення індексу забруднення сольовими компонентами відображені на рис. 4. Аналіз трендів свідчить про позитивну динаміку зниження індексу сольового складу поверхневих вод у с. Забужжя та м. Устилуґ, що вказує на зменшення антропогенного впливу, тоді як у с. Амбуків індекс залишається стабільним і це потребує додаткових досліджень.

За показниками індексу I_1 поверхневі води р. Західний Буг віднесені до відповідних класів та

категорій якості води. У табл. 2 представлені дані пункту спостереження 1 – с. Забужжя, 2 – м. Устилуґ, 3 – с. Амбуків.

У 2021–2023 рр. значення індексу забруднення сольовими компонентами у с. Забужжя знаходилося в межах $2,5\text{--}4$. До лютого 2022 р. якість води оцінювалася як «задовільна» (забруднена, слабо забруднена). У жовтні 2022 р., квітні та вересні 2023 р. клас якості за станом покращився до «доброї», а за ступенем чистоти – до «чистої» або

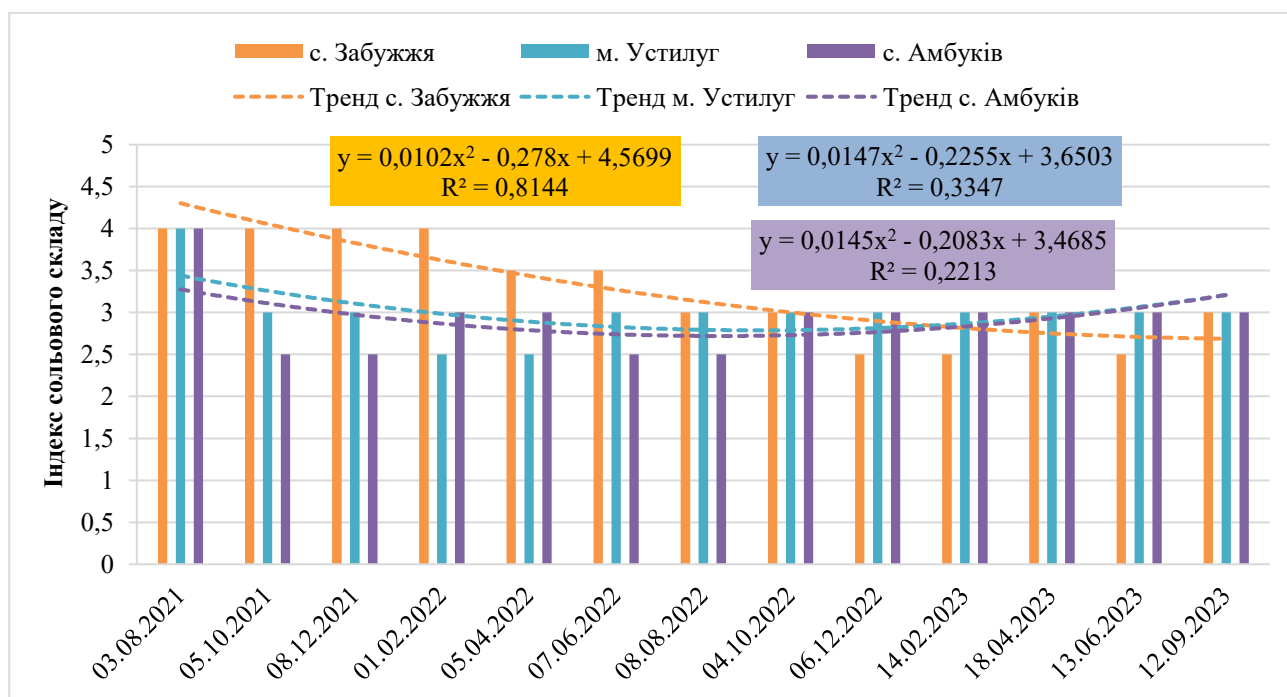


Рис. 4. Тренд індексу забруднення сольовими компонентами, I_1 /
Fig. 4. Trend of the pollution index by salt composition components, I_1

«досить чистої». Найвищі показники якості зафіксовано у грудні 2022 р., лютому та червні 2023 р., коли води відносилися до класу «добрі» і категорії «чисті» за обома критеріями.

У 2021–2023 рр. індекс забруднення компонентами сольового складу у м. Устилуг коливався в межах 2,5–4. Загалом якість води оцінювалася як «добра» (чиста, досить чиста), за винятком лютого та квітня 2022 р., коли показники покращилися до «дуже добрих» (чистих). Водночас у серпні 2021 р. спостерігалось погіршення: води відносилися до класу «задовільних» (забруднених, слабо забруднених). Це пов'язано з підвищенням вмістом забруднюючих речовин, зумовленим скиданням недостатньо очищених стічних вод, змивом забруднень із поверхні ґрунту після опадів, а також посиленням впливу антропогенних чинників у літній період.

За індексом забруднення компонентами сольового складу у с. Амбуків поверхневі води річки загалом належали до класу «добрі» (чисті, досить чисті). У жовтні та грудні 2021 р., червні й серпні 2022 р. якість вод покращилася до «дуже добрих» (чистих). Водночас у серпні 2021 р. спостерігалось погіршення – води оцінювалися як «задовільні» (забруднені, слабо забруднені).

Тренд індексу трофо-сапробіологічних показників представлено на рис. 5.

Найбільші зміни значень I_2 помітні у створі річки в с. Амбуків, де тренд демонструє більше коливань і зростання, що пов'язано з підвищенням надходженням органічних речовин, ймовірно, внаслідок скидів недостатньо очищених стічних

вод, змиванням компонентів добрив із сільськогосподарських угідь, а також інтенсифікацією біологічних процесів у воді. Оцінку якості води за значеннями індексу I_2 представлено у табл. 3.

У 2021–2023 рр. індекс трофо-сапробіологічних показників (I_2) у с. Забужжя коливався в межах 3–4,33. Загалом якість води оцінювалася як «задовільна» (забруднена, слабо забруднена). У квітні 2023 р. показники покращилися до «добрих» (чистих, досить чистих).

У 2021–2023 рр. індекс трофо-сапробіологічних показників у м. Устилуг коливався в межах 3,33–4,33, що відповідало класу «задовільних» вод (забруднених, слабо забруднених). У квітні 2023 р. якість покращилася до «доброї» (чистої, досить чистої), що можна пов'язати з похолоданням, яке сприяло зменшенню біологічної активності та уповільненню процесів органічного забруднення.

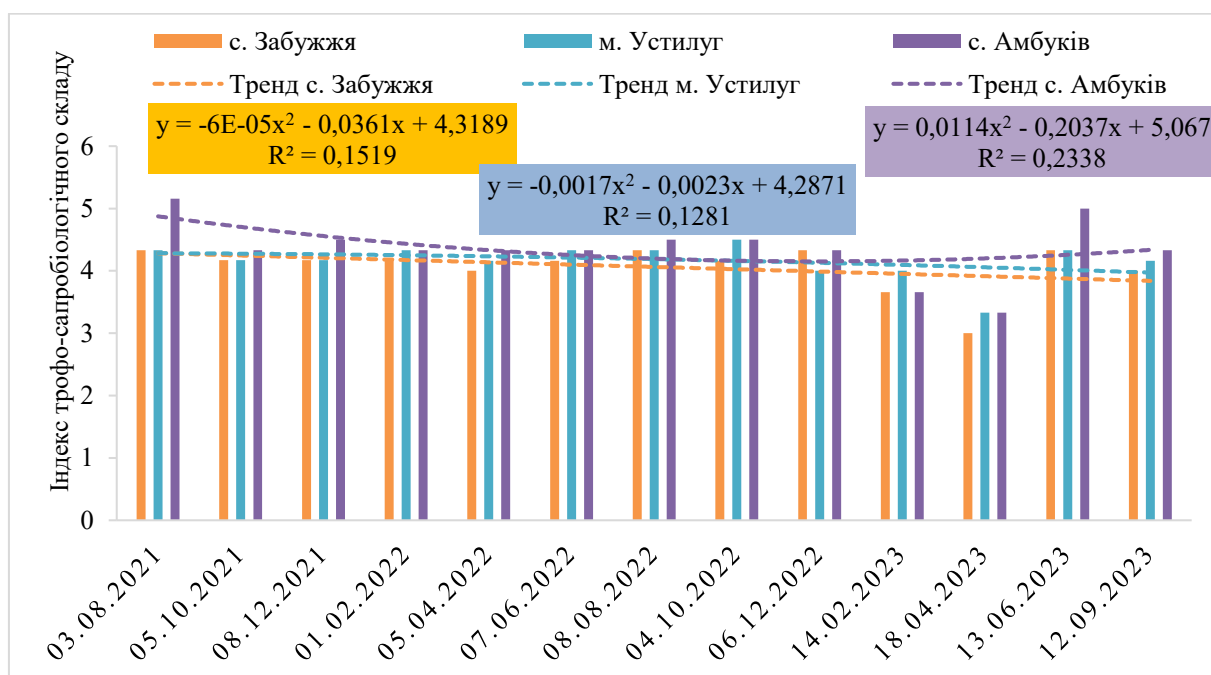
Протягом досліджуваного періоду індекс трофо-сапробіологічних показників у с. Амбуків свідчив про «задовільну» якість води (забруднену, слабо забруднену), що, ймовірно, пов'язано зі скидами недостатньо очищених стічних вод, змивом добрив і розкладом органічної речовини у воді. У серпні 2021 р. та червні 2023 р. якість погіршувалася до «посередньої» (помірно забрудненої). Хоч у квітні 2023 р. води покращувалися до «добрих» (чистих, досить чистих).

Аналіз ліній тренду індексу специфічних показників токсичної дії у трьох пунктах спостереження показав їх співпадіння, що свідчить про відсутність локальних впливів, характерних для ок-

Класи та категорії якості води згідно блокового індексу I_1 /
Classes and categories of water quality according to the value of the block index I_1 *

Дата відбору проб	Пункт спостереження	I_1	Клас якості	Категорія якості	Клас якості за станом	Категорія якості за станом	Клас якості за ступенем чистоти	Категорія якості за ступенем чистоти
3.08.2021	1	4	III	4	3	3	3б	С3
	2	4	III	4	3	3	3б	С3
	3	4	III	4	3	3	3б	С3
5.10.2021	1	4	III	4	3	3	3б	С3
	2	3	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	3	2,5	II	2	Д	ДД	Ч	Ч
8.12.2021	1	4	III	4	3	3	3б	С3
	2	3	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	3	2,5	II	2	Д	ДД	Ч	Ч
1.02.2022	1	4	III	4	3	3	3б	С3
	2	2,5	II	2	Д	ДД	Ч	Ч
	3	3	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
5.04.2022	1	3,5	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	2	2,5	II	2	Д	ДД	Ч	Ч
	3	3	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
7.06.2022	1	3,5	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	2	3	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	3	2,5	II	2	Д	ДД	Ч	Ч
8.08.2022	1	3	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	2	3	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	3	2,5	II	2	Д	ДД	Ч	Ч
4.10.2022	1	3	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	2	3	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	3	3	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
6.12.2022	1	2,5	II	2	Д	ДД	Ч	Ч
	2	3	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	3	3	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
14.02.2023	1	2,5	II	2	Д	ДД	Ч	Ч
	2	3	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	3	3	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
18.04.2023	1	3	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	2	3	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	3	3	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
13.06.2023	1	2,5	II	2	Д	ДД	Ч	Ч
	2	3	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	3	3	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
12.09.2023	1	3	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	2	3	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	3	3	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ

*Джерело: розроблено авторами на основі [11].

Рис. 5. Тренд індексу трофо-сапробіологічного складу, I_2 / Fig. 5. Trend of the tropho-saprobological index, I_2

Таблиця 3 / Table 3

Класи та категорії якості води згідно блокового індексу I_2 /
Classes and categories of water quality according to the value of block index I_2^*

Дата відбору проб	Пункт спостереження	I_2	Клас якості	Категорія якості	Клас якості за станом	Категорія якості за станом	Клас якості за ступенем чистоти	Категорія якості за ступенем чистоти
3.08.2021	1	4,33	III	4	3	3	36	C3
	2	4,33	III	4	3	3	36	C3
	3	5,16	III	5	3	Пс	36	ПЗ
5.10.2021	1	4,17	III	4	3	3	36	C3
	2	4,17	III	4	3	3	36	C3
	3	4,33	III	4	3	3	36	C3
8.12.2021	1	4,17	III	4	3	3	36	C3
	2	4,17	III	4	3	3	36	C3
	3	4,5	III	4	3	3	36	C3
1.02.2022	1	4,17	III	4	3	3	36	C3
	2	4,33	III	4	3	3	36	C3
	3	4,33	III	4	3	3	36	C3
5.04.2022	1	4	III	4	3	3	36	C3
	2	4,16	III	4	3	3	36	C3
	3	4,33	III	4	3	3	36	C3
7.06.2022	1	4,16	III	4	3	3	36	C3
	2	4,33	III	4	3	3	36	C3
	3	4,33	III	4	3	3	36	C3
8.08.2022	1	4,33	III	4	3	3	36	C3
	2	4,33	III	4	3	3	36	C3
	3	4,5	III	4	3	3	36	C3
4.10.2022	1	4,16	III	4	3	3	36	C3
	2	4,5	III	4	3	3	36	C3
	3	4,5	III	4	3	3	36	C3

Продовження таблиці 3 / Continuation of the table 3

6.12.2022	1	4,33	III	4	3	3	36	СЗ
	2	4	III	4	3	3	36	СЗ
	3	4,33	III	4	3	3	36	СЗ
14.02.2023	1	3,66	III	4	3	3	36	СЗ
	2	4	III	4	3	3	36	СЗ
	3	3,66	III	4	3	3	36	СЗ
18.04.2023	1	3	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	2	3,33	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	3	3,33	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
13.06.2023	1	4,33	III	4	3	3	36	СЗ
	2	4,33	III	4	3	3	36	СЗ
	3	5	III	5	3	Пс	36	ПЗ
12.09.2023	1	4	III	4	3	3	36	СЗ
	2	4,16	III	4	3	3	36	СЗ
	3	4,33	III	4	3	3	36	СЗ

*Джерело: розроблено авторами на основі [11].

ремих пунктів. Однакові значення індексу та спільна лінія тренду ($y = 0,0055x^2 - 0,0934x + 2,3462$; $R^2 = 0,4762$) вказують на глобальний характер змін, що охоплюють увесь досліджуваний регіон.

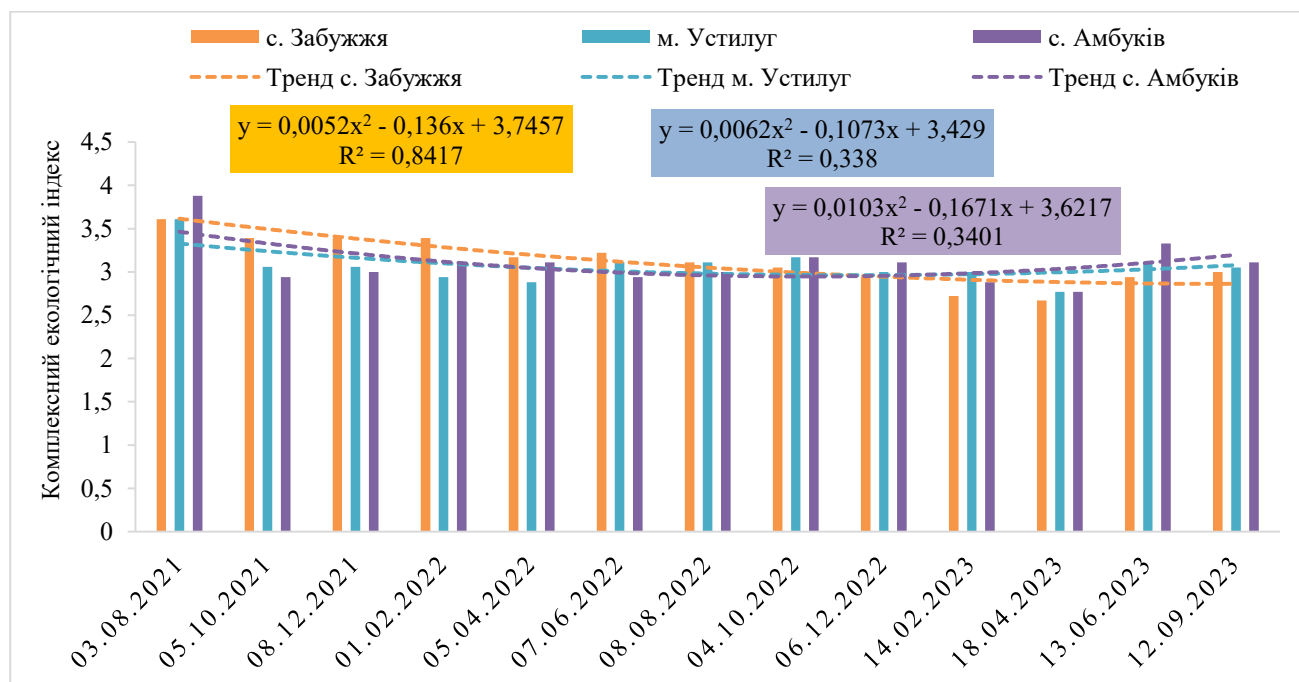
Індекс специфічних показників токсичної дії (I_3) у трьох створах упродовж досліджуваного періоду коливався в межах 2–2,5, що відповідає категорії якості 2 та класу якості II. Відповідно, поверхневі води річки оцінено як «добрі» за станом та «чисті» за ступенем чистоти.

Завершальним етапом дослідження є визначення комплексного екологічного індексу стану поверхневих вод річки (рис. 6). Найвищу відповідність тренду даним спостереження бачимо у с. Забужжя, що свідчить про стабільність екологічних умов у цій локації, тоді як у м. Устилуг та с.

Амбуків варіативність більша, що може свідчити про локальні впливи. Загалом усі тренди вказують на відносну стабільність екологічного стану з потенційними ознаками покращення в останній період.

Класи та категорії якості води р. Західний Буг за комплексним екологічним індексом I_e впродовж 2021–2023 рр. представлено у табл. 4.

Упродовж досліджуваного періоду значення комплексного екологічного індексу I_e (2,67–3,881) свідчило про «добру» якість води (чисту, досить чисту). Однак у серпні 2021 р. якість погіршилася до «задовільної» (забрудненої, слабо забрудненої). Погіршення спричинене підвищенням надходженням забруднюючих речовин, зокрема через скиди недостатньо очищених стічних вод, змив

Рис. 6. Тренд комплексного екологічного індексу, I_e / Fig. 6. Trend of the integrated ecological index, I_e

Таблиця 4/ Table 4

Класи та категорії якості води згідно комплексного екологічного індексу I_e /
Classes and categories of water quality according to the value of the integrated ecological index, I_e *

Дата відбору проб	Пункт спостереження	I_e	Клас якості	Категорія якості	Клас якості за станом	Категорія якості за станом	Клас якості за ступенем чистоти	Категорія якості за ступенем чистоти
3.08.2021	1	3,61	III	4	3	3	36	C3
	2	3,61	III	4	3	3	36	C3
	3	3,88	III	4	3	3	36	C3
5.10.2021	1	3,39	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	2	3,06	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	3	2,94	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
8.12.2021	1	3,39	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	2	3,06	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	3	3	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
1.02.2022	1	3,39	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	2	2,94	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	3	3,11	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
5.04.2022	1	3,17	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	2	2,88	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	3	3,11	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
7.06.2022	1	3,22	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	2	3,11	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	3	2,94	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
8.08.2022	1	3,11	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	2	3,11	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	3	3	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
4.10.2022	1	3,05	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	2	3,17	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	3	3,17	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
6.12.2022	1	2,94	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	2	3	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	3	3,11	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
14.02.2023	1	2,72	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	2	3	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	3	2,88	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
18.04.2023	1	2,67	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	2	2,77	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	3	2,77	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
13.06.2023	1	2,94	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	2	3,11	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	3	3,33	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
12.09.2023	1	3	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	2	3,05	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ
	3	3,11	II	3	Д	Д	Ч	ДЧ

*Джерело: розроблено авторами на основі [11].

агрохімікатів та посилення біологічних процесів у літній період.

Висновки. Проведений аналіз стану поверхневих вод р. Західний Буг засвідчив, що вміст за-

бруднюючих речовин переважно знаходився в межах допустимих норм. Поодинокі перевищення стосувалися фосфатів, завислих речовин та амонію сольового, однак зафіксовано тенденцію до

зменшення концентрації останнього протягом досліджуваного періоду, що пов'язане з підвищенням рівня очищення стічних вод, природними процесами нітрифікації, а також гідрометеорологічними умовами.

Якість води за індексом забруднення компонентами сольового складу коливалася від «задовільної» до «доброї», демонструючи покращення у другій половині досліджуваного періоду. Трофосапробіологічний індекс свідчить про слабе забруднення води у всіх створах, тоді як специфічні показники токсичної дії підтверджують її «чистий» та «добрий» стан. Упродовж досліджуваного періоду вода залишалася екологічно безпечною, з

мінімальним впливом токсичних речовин. Комплексний екологічний індекс підтверджує загальнодобру якість і відносну чистоту води р. Західний Буг у всіх пунктах спостереження.

Однак, для покращення якості поверхневих вод р. Західний Буг рекомендується посилити контроль за скиданням стічних вод, впровадити сучасні очисні технології, обмежити використання агрохімікатів та активізувати еколого-просвітницьку роботу серед населення. Важливими є розширення транскордонної співпраці та модернізація систем моніторингу, що сприятиме забезпеченню сталого управління водними ресурсами.

Список використаних джерел

1. Басейнове управління водних ресурсів річок Західного Бугу та Сяну. (n.d.). Офіційний сайт. <https://buvrzbts.davr.gov.ua/> (Accessed October 20, 2024)
2. Караїм, О. А., Караїм, В. П., Бєдункова, О. О., Лавринюк, З. В., & Джам, О. А. (2024). Оцінка антропогенного впливу в аспекті басейнового екологічного управління. Вісник НУВГП. Сільськогосподарські науки: збірник наукових праць, 1(105), 97–119. <https://doi.org/10.31713/vs120247>
3. Ковальчук, І. П. (2009). Управління водогосподарською та водоохоронною діяльністю (на прикладі басейну Західного Бугу). Український географічний журнал, (3), 49–53.
4. Коніщук, В., Шумисай, І., & Мартиненко, В. (2023). Екологічний та гідрохімічний аналіз річок природного заповідника «Древлянський» (Україна). Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», 58, 336–349. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-25>
5. Лисиця, А. В., Лико, Д. В., Портухай, О. І., Логвиненко, І. П., & Лико, С. М. (2024). Оцінка якості поверхневих вод транскордонної річки Західний Буг за вмістом сполук нітрогену. Природнича освіта та наука, 5, 67–74. <https://doi.org/10.32782/NSER/2024-5.13>
6. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. (2021). Методичні рекомендації з розроблення нормативів гранично-допустимого скидання забруднюючих речовин у водні об'єкти із зворотними водами (Наказ № 173). <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0173926-21#Text> (Accessed November 26, 2024)
7. Некос, А., Боярин, М., Цьось, О., Нетробчук, І., & Волошин, В. (2023). Визначення макрофітового індексу (MIR) як індикатора якості води у річці Прип'ять. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», 58, 360–370. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-27>
8. Павліха, Н. В., Яков'юк, В. А., & Цимбалюк, І. О. (2023). Управління транскордонними водними ресурсами на засадах сталого розвитку: монографія. Луцьк: Вежа-Друк.
9. Регіональний офіс водних ресурсів у Волинській області. (n.d.). Офіційний сайт. <https://vodres.gov.ua/> (Accessed November 20, 2024)
10. Романенко, В. Д., Жукинський, В. М., & Оксіюк, О. П. (2001). Методика встановлення і використання екологічних нормативів якості поверхневих вод суші та естуаріїв України. Київ: Освіта.
11. Романенко, В. Д., Жукинський, В. М., & Оксіюк, О. П. (1998). Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями. Київ: Символ-Т.
12. 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. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-24>
13. Фесюк, В. О., Льїн, Л. В., Мороз, І. А., & Льїна, О. В. (2020). Екологічна оцінка якості води різномісних озер Волинської області, що інтенсивно використовуються в рекреації. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», 52, 236–250. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-52-17>
14. Basiuk, T., Gopchak, I., & Yatsyk, A. (2023). Ecological condition of river basins of Western Polesie of Ukraine. In A. Rokochinskiy, L. Kuzmych, & P. Volk (Eds.), *Handbook of Research on Improving the Natural and Ecological Conditions of the Polesie Zone* (pp. 384–401). IGI Global Scientific Publishing. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-8248-3.ch024>
15. Đurišić-Mladenović, N., Živančev, J., Antić, I., Rakić, D., Buljovčić, M., Pajin, B., Llorca, M., & Farre, M. (2024). Occurrence of contaminants of emerging concern in different water samples from the lower part of the Danube River Middle Basin – A review. *Environmental Pollution*, 363(Part 1), 125128. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125128>
16. European Union. (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of water policy (EU Water Framework Directive). *Official Journal of the European Communities*, L 327/1, 1–118.
17. Gopchak, I., Kalko, A., Basiuk, T., Pinchuk, O., Gerasimov, I., Yaromenko, O., & Shkiryntets, V. (2020). Assessment of surface water pollution in Western Bug River within the cross-border section of Ukraine. *Journal of Water and Land Development*, 46(VII–IX), 97–104. <https://doi.org/10.24425/jwld.2020.134201>

18. Grzywna, A., Bronowicka-Mielniczuk, U., & Polec, K. (2021). Spatio-temporal changes of water pollution, and its sources and consequences in the Bug River, Poland. *Desalination and Water Treatment*, 243, 18–36. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27848>
19. Odnorih, Z., Manko, R., Malovanyy, M., & Soloviy, K. (2020). Results of surface water quality monitoring of the Western Bug River basin in Lviv Region. *Journal of Ecological Engineering*, 21(3), 18–26. <https://doi.org/10.12911/22998993/118303>
20. Popovych, V., Skrobala, V., Tyndyk, O., & Kaspruk, O. (2024). Hydro-ecological monitoring of heavy metal pollution of water bodies in the Western Bug River basin within the mining-industrial region. *Mining of Mineral Deposits*, 18(4), 139–152. <https://doi.org/10.33271/mining18.04.139>
21. Shakhman, I., & Bystriantseva, A. (2021). Water quality assessment of the surface water of the Southern Bug River basin by complex indices. *Journal of Ecological Engineering*, 22(1), 195–205. <https://doi.org/10.12911/22998993/128858>

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Ecological assessment of surface water quality of the Western Bug river in the border region of Ukraine and Poland

Ivan Kovalchuk¹

DSc (Geography), Professor, Head of the Department of Geodesy and Cartography,
¹ National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine;

Olha Karaim²

PhD (Economics), Associate Professor,

Department of Ecology and Protection of Environment,

² Lesya Ukrainka Volyn National University, Lutsk, Ukraine;

Olena Dzham²

PhD (Chemistry), Associate Professor,

Department of Ecology and Protection of Environment;

Zoryana Lavrynyuk²

PhD (Chemistry), Associate Professor,

Department of Ecology and Protection of Environment;

Volodymyr Karaim²

PhD's degree student

ABSTRACT

The **purpose** of the work is to conduct an environmental assessment of the surface water quality of the Western Bug River within the border region of Ukraine and Poland.

Methods. The study employed methods of generalization and systematization, analysis and synthesis, comparative, abstract-logical, and sequential approaches.

Results. An analysis was conducted on the content of major pollutants at three observation points along the Western Bug River (1 – Zabužje village, border with the Republic of Poland; 2 – Ustyluh city, 500 m downstream from the confluence of the Luga River, border with the Republic of Poland; 3 – Ambukiv village, 500 m downstream from the confluence of the Khuchva River, border with the Republic of Poland) in 2021–2023. It was established that the concentration of most pollutants in the surface waters of the Western Bug River remained within the normative limits during the study period. Occasional exceedances were observed for suspended solids and phosphates across all observation points. In the first half of the study period, an excess of ammonium salt concentrations was noted, but a gradual decrease in this parameter was observed from 2021 to 2023. The concentration of nitrites remained within permissible limits at all observation points throughout the study period. According to the pollution index for salt composition components, the water quality of the Western Bug River improved over time. In Zabužje, it ranged from “satisfactory” (until February 2022) to “good” (until September 2023), while in Ustyluh, it remained consistently “good”. At the Ambukiv observation point, the water was classified as “good” with a “very good” category, remaining “clean” and “fairly clean” throughout the period. The tropho-saprobic index indicates slight pollution at all observation sites. The water was classified as “satisfactory” in terms of condition, while its purity ranged from “polluted” to “slightly polluted”. However, based on the index of specific toxic indicators, the water at all sites remained “good” to “very good” in condition and consistently “clean”. The comprehensive environmental index confirmed an overall “good” condition of surface waters at all sites from 2021 to 2023, with purity levels classified as “clean” and “fairly clean.” Based on the comprehensive environmental index, the surface waters of the Western Bug River in 2021–2023 at all three observation sites were characterized as “good” in terms of water quality class based on condition, “good” in terms of quality category based on condition, “clean” in terms of water purity class, and “fairly clean” in terms of purity category.

Conclusions. The assessment of the ecological state of the Western Bug River from 2021 to 2023 indicates that its surface waters largely meet the normative quality standards. A gradual improvement in parameters, particularly a reduction in ammonium salt concentration, has been observed. According to the comprehensive environmental index, the waters at all three observation sites are characterized as “good” and “clean”.

Keywords: transboundary river, Western Bug, surface waters, water quality assessment, monitoring, environmental control, ecological status, pollutants, water resource management.

References

1. Basin Administration of Water Resources of the Western Bug and Sian. (n.d.). Official website. Retrieved October 20, 2024, from <https://buvrzbts.davr.gov.ua/>
2. Karaim, O. A., Karaim, V. P., Bedunkova, O. O., Lavryniuk, Z. V., & Dzhum, O. A. (2024). Assessment of anthropogenic impact in the aspect of basin ecological management. *Bulletin of NUVGP. Agricultural Sciences*, (1), 97–119. <https://doi.org/10.31713/vs120247> [in Ukrainian].
3. Kovalchuk, I. P. (2009). Water management and water protection activities management (on the example of the Western Bug basin). *Ukrainian Geographical Journal*, (3), 49–53. [in Ukrainian].
4. Konishchuk, V., Shumihai, I., & Martynenko, V. (2023). Ecological and hydrochemical analysis of rivers in the “Drevlianskyi” Nature Reserve (Ukraine). *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series “Geology. Geography. Ecology”* (58), 336–349. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-25> [in Ukrainian].
5. Lysytsia, A. V., Lyko, D. V., Portukhai, O. I., Lohvynenko, I. P., & Lyko, S. M. (2024). Assessment of surface water quality of the transboundary Western Bug River by nitrogen compounds. *Natural Science and Education Research*, (5), 67–74. <https://doi.org/10.32782/NSER/2024-5.13> [in Ukrainian].
6. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. (2021, March 5). Methodological recommendations for developing standards for maximum allowable discharge of pollutants into water bodies with return waters (Order №. 173). Retrieved November 26, 2024, from <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0173926-21#Text>
7. Nekos, A., Boyarin, M., Tsios, O., Netrobchuk, I., & Voloshyn, V. (2023). Determination of the Macrophyte Index (MIR) as an indicator of water quality in the Pripjat River. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series “Geology. Geography. Ecology”* (58), 360–370. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-27> [in Ukrainian].
8. Pavlikha, N. V., Yakovyuk, V. A., & Tsybalyuk, I. O. (2023). Management of transboundary water resources on the principles of sustainable development: Monograph. Luts'k: Vezha-Druk [in Ukrainian].
9. Regional Office of Water Resources in the Volyn Region. Official website. Retrieved from <https://vodres.gov.ua/>
10. Romanenko, V. D., Zhukynskyi, V. M., & Oksiyuk, O. P. (2001). Methodology for establishing and using environmental quality standards for surface waters and estuaries of Ukraine. Kyiv: Osvita [in Ukrainian].
11. Romanenko, V. D., Zhukynskyi, V. M., & Oksiyuk, O. P. (1998). Methodology for ecological assessment of surface water quality by relevant categories. Kyiv: Symbol-T [in Ukrainian].
12. Ukhan, O., & Osadcha, N. (2023). Load of biogenic elements and organic substances in the rivers of the Don Basin (sub-basin of the Siverskyi Donets River). *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series “Geology. Geography. Ecology”* (59), 320–328. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-24> [in Ukrainian].
13. Fesiuk, V. O., Ilyin, L. V., Moroz, I. A., & Ilyina, O. V. (2020). Ecological assessment of water quality in different types of lakes in the Volyn region, which are intensively used for recreation. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series “Geology. Geography. Ecology”* (52), 236–250. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-52-17> [in Ukrainian].
14. Basiuk, T., Gopchak, I., & Yatsyk, A. (2023). Ecological condition of river basins of Western Polesie of Ukraine. In A. Rokochinskyi, L. Kuzmych, & P. Volk (Eds.), *Handbook of Research on Improving the Natural and Ecological Conditions of the Polesie Zone* (pp. 384–401). IGI Global Scientific Publishing. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-8248-3.ch024> [in Ukrainian].
15. Durišić-Mladenović, N., Živančev, J., Antić, I., Rakić, D., Buljovčić, M., Pajin, B., Llorca, M., & Farre, M. (2024). Occurrence of contaminants of emerging concern in different water samples from the lower part of the Danube River Middle Basin – A review. *Environmental Pollution*, 363 (Pt 1), 125128. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125128>.
16. European Union. (2000). EU Water Framework Directive 2000/60/EC. *Official Journal of the European Communities*, L 327/1, 118.
17. Gopchak, I., Kalko, A., Basiuk, T., Pinchuk, O., Gerasimov, I., Yaromenko, O., & Shkiryntets, V. (2020). Assessment of surface water pollution in the Western Bug River within the cross-border section of Ukraine. *Journal of Water and Land Development*, (46), 97–104. <https://doi.org/10.24425/jwld.2020.134201>.
18. Grzywna, A., Bronowicka-Mielniczuk, U., & Polec, K. (2021). Spatio-temporal changes of water pollution, and its sources and consequences in the Bug River, Poland. *Desalination and Water Treatment*, (243), 18–36. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27848>.
19. Odnorih, Z., Manko, R., Malovanyy, M., & Soloviy, K. (2020). Results of surface water quality monitoring of the Western Bug River Basin in Lviv Region. *Journal of Ecological Engineering*, 21(3), 18–26. <https://doi.org/10.12911/22998993/118303>.
20. Popovych, V., Skrobala, V., Tyndyk, O., & Kaspruk, O. (2024). Hydro-ecological monitoring of heavy metal pollution in the Western Bug River basin within the mining-industrial region. *Mining of Mineral Deposits*, 18(4), 139–152. <https://doi.org/10.33271/mining18.04.139>.
21. Shakhman, I., & Bystriantseva, A. (2021). Water quality assessment of the surface water of the Southern Bug River basin by complex indices. *Journal of Ecological Engineering*, 22(1), 195–205. <https://doi.org/10.12911/22998993/128858>.

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 1 March 2025

Accepted 4 April 2025

Green infrastructure of Ukrainian cities in the context of the European Green Deal

*Nadiya Maksymenko*¹

DSc (Geography), Professor, Head of the Department of Environmental Monitoring and Protected Areas Management, ¹ V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine, e-mail: maksymenko@karazin.ua,  <http://orcid.org/0000-0002-7921-9990>;

*Vilina Peresadko*¹

DSc (Geography), Professor, Department of Physical Geography and Cartography, e-mail: vilinaperesadko@karazin.ua,  <https://orcid.org/0000-0002-2439-2788>;

*Alina Hrechko*¹

Lecturer, Department of Environmental Monitoring and Protected Areas Management, e-mail: a.a.hrechko@karazin.ua,  <https://orcid.org/0000-0001-9987-2586>;

*Svitlana Burchenko*¹

PhD (Earth sciences), Senior Lector of the Department of Environmental Monitoring and Protected Areas Management, e-mail: s.burchenko@karazin.ua,  <https://orcid.org/0000-0001-5366-5397>;

*Hanna Skryhan*²

PhD (Geography), Associate Professor on Ecology, ² Erda Research, Technology, Education; [Hague, Netherlands](https://www.erda.nl/), e-mail: skrane4ka@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0002-3767-6923>

ABSTRACT

Introduction. Increasing urbanisation, climate change and environmental challenges highlight the importance of a comparative assessment of the provision of green infrastructure in Ukrainian cities to improve the quality of the urban environment and the lives of citizens. A comparative assessment of the provision of green infrastructure in Ukraine's regional centres will help identify the level of green space development in each city, as well as their current problems and potential for further development. Such an analysis will enable local authorities and policy makers to take the necessary measures to improve the condition of green infrastructure and increase its accessibility to all city residents.

The purpose of article. To determine the peculiarities of the formation and functioning of green infrastructure (GI) in the cities-regional centres of Ukraine, to compare the provision of the population with green areas in different administrative units of these cities.

Research methods. To obtain statistical information on the population of each district of the city and the area of individual green areas, the method of statistical analysis and interpretation of remote sensing materials was used. For this purpose, satellite images from the Google Earth mapping service were used. Mathematical calculations were made in accordance with the generally accepted Green Index, which was defined as the ratio between the area of a district (city) and the number of its inhabitants.

Main findings. The geographical analysis based on geodata and indices allowed us to assess the state of green areas in cities, identify the lack of green areas, and decide on the necessary measures to increase and improve green space. According to the results of the analysis, the cities with the most green infrastructure are Uzhhorod, Donetsk, Ternopil, Kropyvnytskyi, Rivne and Kharkiv, where the green indices are 136, 45, 39, 31, 29 26. This indicates that cities are actively working to preserve green areas and create comfortable environmental conditions for residents. On the other hand, in cities such as Luhansk (0.78), Sumy (2.73), Odesa (2.87), Mykolaiv (3.3), and Poltava (3.58), the area of green areas reaches catastrophic levels. They are more than 5 times behind the average European standards. The overall conclusion is that the state of green infrastructure in Ukrainian cities is diverse and requires attention at different levels. Cities that are leading the way in creating and maintaining green spaces show that it is possible and contribute to improving the quality of life of their residents. At the same time, cities with an insufficient amount of green space lag behind the standards, which can have a negative impact on health and the overall state of the urban environment.

Scientific novelty and practical value. This study for the first time summarises the material on all regional centres of Ukraine regarding the provision of green infrastructure, calculates green indices, conducts spatial analysis and develops relevant recommendations.

Keywords: Green Infrastructure, Green Index, Districts, Green Zone, Green Corridors, urban landscape, European Green Deal.

In cites: Maksymenko Nadiya, Peresadko Vilina, Hrechko Alina, Burchenko Svitlana, Skryhan Hanna (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>

Relevance of the research topic. Anthropogenic pressure on the environment is increasing every year. In urban environments, the conflict between socio-economic development and the natural ecosystem [1] becomes more noticeable due to: an increase

in the temperature of the city compared to the surrounding rural areas (or the urban heat island effect), which is facilitated by an increase in the amount of asphalt pavement, which changes the thermal and reflective capacity of the surface [2], air pollution due

to intensive traffic, industrial enterprises, changes in the structure of natural landscapes, for example, filling in natural gullies for the construction of high-rise buildings and increasing pressure on the lithosphere due to them, destruction of natural biodiversity, regulation of rivers, interference with the direction of surface runoff, destruction of natural forests, etc. [3]. Therefore, given the pressure of the urban environment on the environment and the projected rapid growth of the urban population by 2025, it is necessary to take measures to reduce pressure and improve the urban environment to meet the needs of sustainable development.

The use of the concept of green infrastructure in the urban environment is one of the best methods for coordinating environmental, social, and economic development and can serve as a key to achieving important goals of the sustainable development strategy [4,5].

State of the art, main works. The development of the concept of green infrastructure began in the 1980s as a way to manage surface runoff [6], but article [7] highlights that the rapid growth in demand for green infrastructure and scientific work on the development of the concept to ensure the sustainability of the urban environment dates back to 1995.

Approaches to the definition of the term “green infrastructure” are quite diverse, in the article by Laver S. and Taylor [8] and Neumann S. et al. [9] define it as a planned or managed spatial structure and network of interconnected environmental objects, natural areas, open spaces and landscapes, the European Commission defines it as: a strategically planned network of natural and semi-natural areas with different ecological features, designed and capable of providing a wide range of ecosystem services [10]. And the UK Green Infrastructure Guidelines define green infrastructure as: “a strategically planned and implemented network that includes a wide range of high quality green spaces and other disaster facilities” [11]. Despite the difference in interpretations, the key aspects of green infrastructure are that it is an object of both natural and semi-natural origin that can improve the urban environment.

The use of the green infrastructure concept provides a number of benefits that ensure the sustainability of the territory [12-16]:

- creation of habitats for the development of biodiversity;
- creation of places for recreation and support of mental and physical health;
- moisture retention and stormwater management;
- maintaining and ensuring the microclimate, including the reduction of the urban heat island phenomenon;
- purification of atmospheric air;

- carbon sequestration;
- oxygen production;
- optimization of urban space differentiation;
- noise reduction, etc.

The concept of green infrastructure is closely related to other important concepts for ensuring the sustainability of the urban environment, such as the European Green Deal.

The European Green Deal is a strategic initiative of the European Union aimed at achieving climate neutrality by 2050 and transition to sustainable development that minimizes negative impact on the environment [17]. The provisions of the European Green Deal set out a strategy for transitioning the economy to a circular economy, which will make it possible to transform the economy into a sustainable one and change climate and environmental challenges into opportunities [18]. The Green Deal, according to [19], includes: stimulating the process of carbon sequestration, reducing energy consumption in construction, and restoring ecosystems to increase their adaptation to climate change. These aspects of the Green Deal can be achieved by creating new elements of green infrastructure and expanding existing ones.

Green infrastructure, such as forests, wetlands, and other natural systems, can help regulate the water balance, reduce the effects of floods and droughts, and mitigate the risks associated with extreme weather events [20]. Restoring and expanding natural environments is a priority for biodiversity conservation [21]. The European Green Deal provides for the creation and maintenance of ecological corridors that allow animals and plants to migrate and adapt to climate change [22]. Green infrastructure in urban areas helps to clean the air, reduce air temperature due to the effect of urban heat islands, and improves the mental and physical health of the population [23]. Green infrastructure contributes to the efficient use of resources by improving conditions for water storage, air purification, and reducing ground pollution, which is in line with the principles of the circular economy, which is the basis of the European Green Deal [24].

Thus, green infrastructure is a critical component in the implementation of the European Green Deal, and it improves the established sustainable ecosystems that help mitigate climate change, preserve biodiversity, and improve the quality of life of citizens.

The aim of the study is to identify the features of the formation and functioning of green infrastructure (GI) in regional centers of Ukraine, and to compare the population's access to green areas across different administrative units of these cities.

Research methods. In order to assess the effectiveness of biodiversity conservation measures in Ukrainian cities, such as the creation and develop-

ment of green areas, it is necessary to perform more than just a theoretical analysis. To fully cover the study, we chose to assess the availability of parks, gardens, squares, and other recreational facilities. The calculation did not include single trees, city cemeteries, and neighborhood plantings due to their small area and insufficient landscaping.

To obtain statistical information on the population of each city district and the area of individual green areas, the method of statistical analysis and decoding of remote sensing materials was used. For this purpose, satellite images from the Google Earth mapping service [25] were used to estimate the area of parks, squares, and forests that were not included in the general data or Natura 2000 environmental projects.

The mathematical calculations were made in accordance with the generally accepted Green Index, defined as the ratio between the area of a district (city) and the number of its inhabitants.

$$GI = P / N,$$

where: P - green area of the district, m²

N - population, persons.

The conclusions drawn based on these calculations were compared with European standards for urban greening requirements.

Research results. Green areas in Ukrainian cities play an important role in creating a healthy and livable environment for residents. They include parks, squares, gardens, forest parks and other green areas.

The number and size of green areas in different cities in Ukraine can vary considerably depending on their geographical location, size, and the availability of relevant infrastructure projects. Regional centers and large cities usually have more green areas as they are the administrative, cultural and tourist centers of the regions.

However, not all cities in Ukraine have sufficiently developed green infrastructure. This may be due to insufficient funding, improper planning of urban development projects, and a lack of awareness of the importance of green areas for the quality of life of residents. Therefore, it is an urgent task to increase attention to green infrastructure and implement strategies for its development in all Ukrainian cities.

To assess the real situation, we conducted a study of the provision of green infrastructure facilities to the population of Ukrainian cities and regional centers (Table 1).

Let's analyze each city separately in terms of the Green Index.

Cherkasy. It covers an area of 75 km² and has a population of 269,800 people. The calculated area of green areas in the city is 1.8 km², which accounts for 6.67 m² of green space per capita.

The green index in the city is as follows:

Sosnovskyi district 8.32 m²/person (Cherkasy City Park 'Sosnovyi Bor'; Small Victory Park; Cherkasy Zoo; City Hospital Park; Bohdan Khmelnytskyi Square; Yunist Park; Druzhba Park; Nadiia Park; Botanical Garden; Green Grove);

Prydniprovskyi district 9.60 m²/person (Park Khimikiv; Kozatskyi Park; Park named after Sergeant Smirnov; Valley of Roses; Dniprovskyi Park; Square on the Square of the Three Hundredth Anniversary of the City; Sobornyi Park; Cherkaska Bor; Yuvileinyi Park; Solnechnyi Park; Sosnovskyi Park; Sportvnyi Park; Lisova Pisnia Park).

Examples of the most favourite parks of the city's residents [48]:

- Valley of Roses Park. Here, every resident and visitor of the city can enjoy the coolness of one of the mini-lakes or fountains, stroll along the winding alleys, and relax on a bench.

- Sosnovy Bor Park. It is the largest and oldest park in the city, with more than 70 valuable and exotic trees.

- Victory Park. It has shady alleys, beautiful cascading ponds and fountains. There are many monuments dedicated to various heroic events in Victory Park.

- Park Khimikiv. The highlight of the green area is a paved alley that runs along the perimeter of the entire park [48].

Chernivtsi covers an area of 152.7 km² and has a population of 264,300 people. The calculated area of green areas is 1.22 km², where the green index per capita is 4.62 m².

The green index in each district of the city is represented by green areas [49] and is as follows:

- Pervomaiskyi district 2.05 m²/person (Yurii Fedkovych Park; Horyachyi Urban Reserve Park; Chernivtsi Dendrological Park);

- Sadhirskeyi district 0.07 m²/person (Sadhirskeyi Park);

- Shevchenkivskyi district 36.93 m²/person (Taras Shevchenko Central Park of Culture and Recreation; Shyler Park; Botanical Garden of Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University; Zhovtnevyi Park; Chernivtsi Dendrological Park).

Chernihiv. It covers an area of 79 km² and has a population of 282,700 people. The calculated area of green areas in Chernihiv is 3.6 km², which is 12.73 m² of green space per capita.

Green areas, such as parks and squares, play a significant role in creating natural areas for recreation for local residents and visitors. Among the most popular green spaces are the following [50]:

- Central Park of Culture and Recreation. It is a traditional place for recreation and leisure for local residents, where mass events and festivities are often held.

Table 1

Components of the Green Index of Ukrainian Cities and Regional Centers

City	Population as of 01.01.2023 thousand people [26]	Area as of 01.01.2023, km ² [27]	Area of the city's green zone, km ²	GI, %	Green Index, m ² /person
Cherkasy	269,8	75	1,8	2,4	6,67
Chernihiv	282,7	79,0	3,6	4,6	12,73
Chernivtsi	264,3	153,0	1,2	0,8	4,62
Dnipro	968,5	409,7	5,0	1,2	5,16
Donetsk	901,6	358,0	40,7	11,4	45,14
Ivano-Frankivsk	238,2	83,7	1,4	1,7	5,88
Kharkiv	1421,1	350,0	37,7	10,8	26,55
Kherson	279,1	65,2	1,9	2,9	6,66
Khmelnitskyi	274,5	93,0	1,1	1,2	4,01
Kropyvnytskyi	219,7	115,0	7,0	6,1	31,86
Kyiv	2952,3	839,2	54,9	6,5	18,60
Luhansk	397,7	286,0	0,3	0,1	0,78
Lutsk	216,0	42,0	2,4	5,7	11,11
Lviv	717,3	149,0	11,4	7,7	15,89
Mykolaiv	470,0	259,8	1,6	0,6	3,30
Odesa	1010,5	162,4	2,9	1,8	2,87
Poltava	279,6	112,0	1,0	0,9	3,58
Rivne	243,9	64,0	7,1	11,1	29,23
Simferopol	338,3	107,0	2,0	1,9	6,02
Sumy	256,5	95,0	0,7	0,7	2,73
Ternopil	225,0	86,0	8,9	10,3	39,56
Uzhhorod	115,4	60,0	15,7	26,2	136,05
Vinnitsia	369,7	113,0	1,6	1,4	4,19
Zaporizhzhia	710,1	334,0	5,0	1,5	7,00
Zhytomyr	261,6	65,0	2,3	3,5	8,75
Ukraine	13683,4	4556,0	219,1	4,8	16,02

- Bohdan Khmelnytskyi Square. Located in the historic centre of the city. The square has the shape of an irregular rectangle, which is why it attracts residents and visitors.

- Alley of Heroes. It is here that the largest number of cultivars can be found among other park areas in Chernihiv.

- Boldina Gora Park. The highest point of Chernihiv, it is home to one of the largest necropolises in Ukraine, consisting of 232 mounds, which makes it a historical attraction.

Dnipro. This city is one of the largest in Ukraine. As of 2023, the territory of the city of Dnipro is 409.7 km², and the population is 968.5 thousand people [26]. The calculated area of green areas in the city of Dnipro is 5 km², which accounts for 5.16 m² of green areas per capita (Table 1).

The largest and most popular green areas in the city include [29]:

- Globa Park: One of the largest parks in the city, offering large green areas for recreation, sports, and walking.

- Metallurgists Park: Located on the banks of the Dnipro River, this park offers beautiful views of the river and picnic areas.

- Heroes of the Maidan Square: Known for its architectural beauty and cultural events.

- Taras Shevchenko Park: A large park with many different plants and alleys.

In the city of **Donetsk**, green areas cover a total of 40.7 km², which accounts for 11.37% of the city's overall territory. The average green index is 41.46 m² per person; however, this figure varies significantly across different districts. The highest green index is recorded in the Petrovskyi district – 146.34 m²/person – indicating a large amount of green space relative to its relatively small population. The Proletarskyi district also demonstrates a high index – 91.3 m²/person. In contrast, the lowest values are found in the Voroshylovskyi (6.55 m²/person) and Budionivskyi (11.33 m²/person) districts.

Petrovskyi district has the highest share of green infrastructure in relation to its total area (18.96%), while Budionivskyi has the lowest (1.25%).

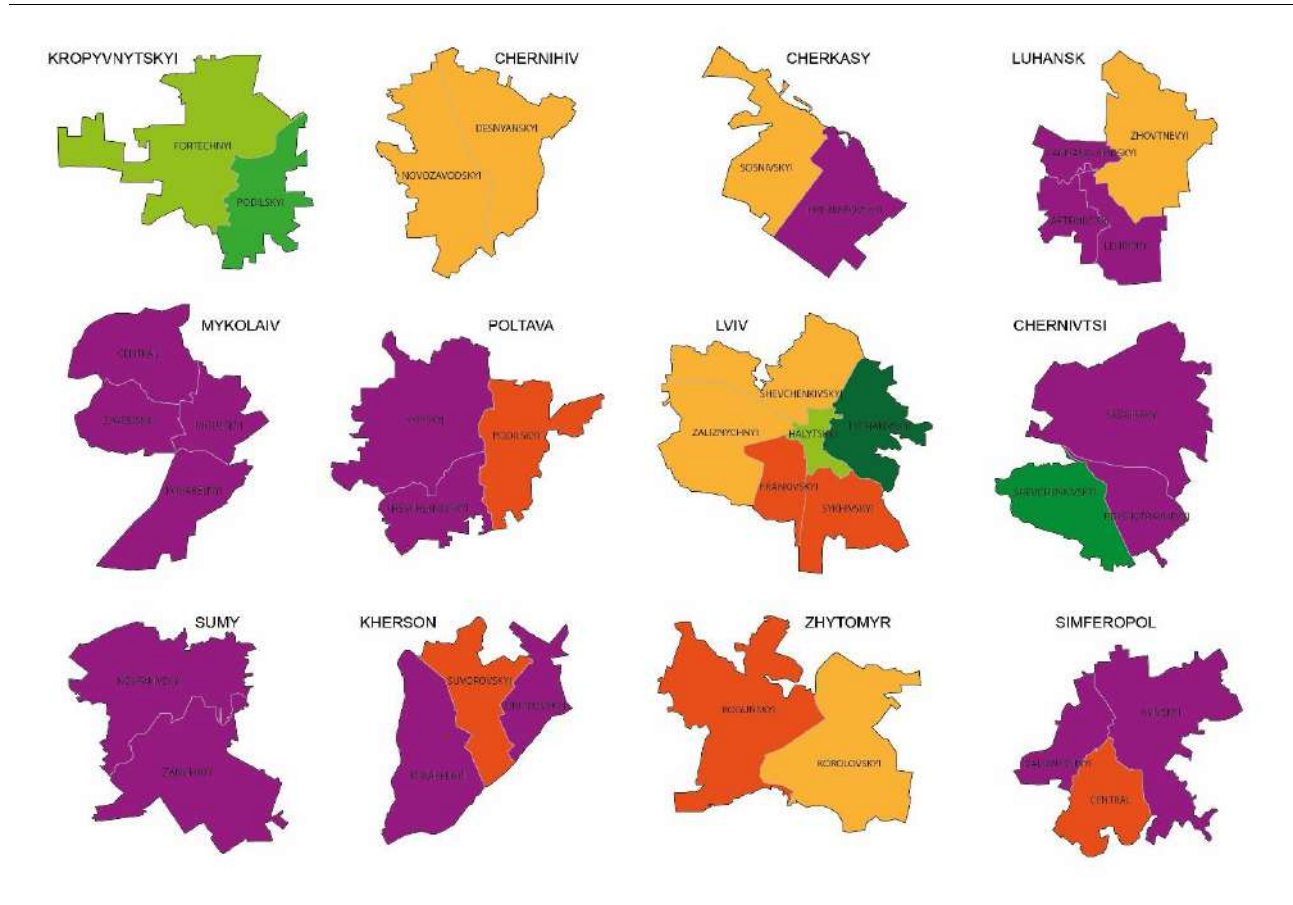
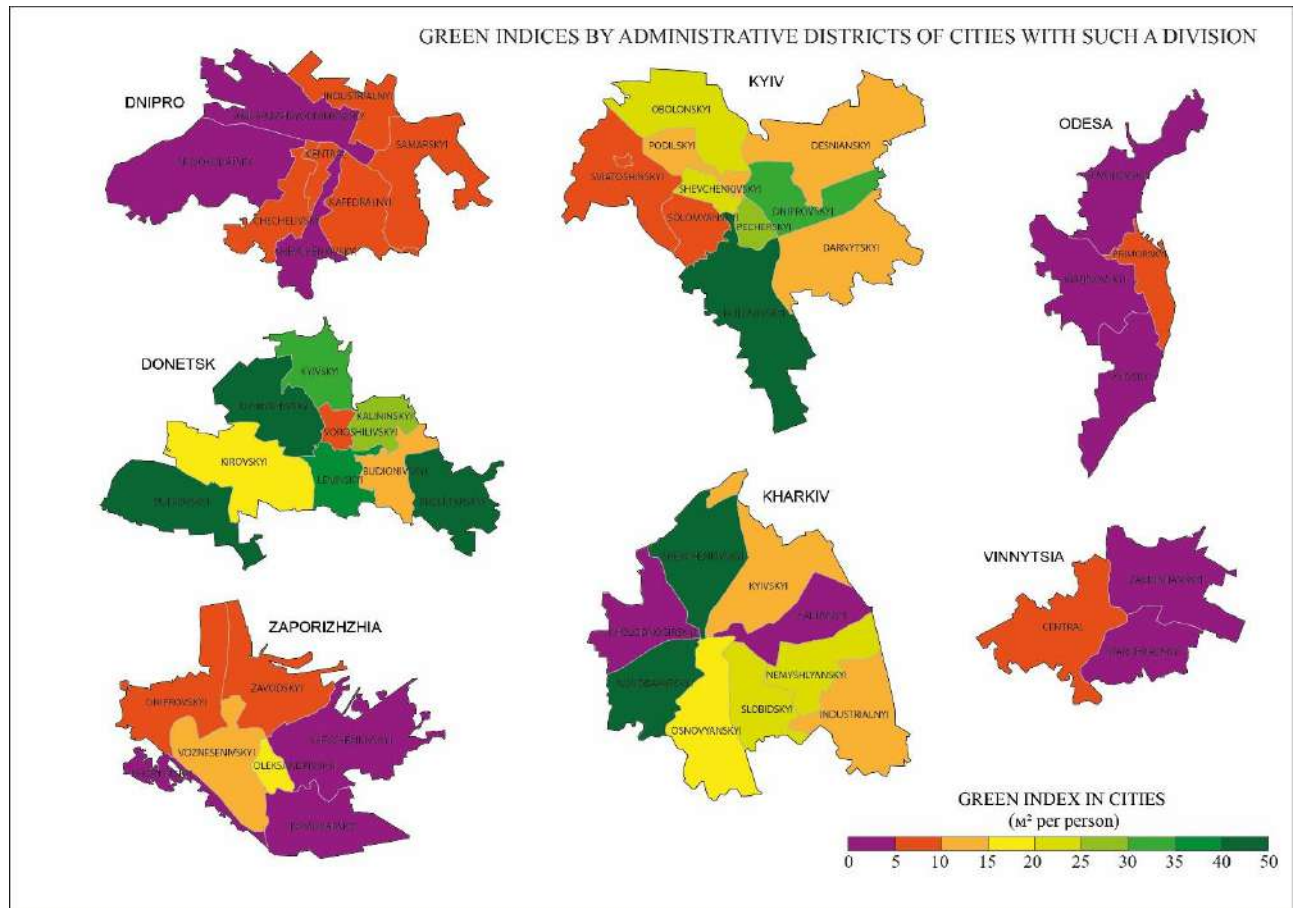


Fig. 1. Green indices by administrative districts of cities with such a division

Donetsk's green zones include parks, squares, boulevards, forest parks, and riverside plantings. Among the most notable sites are:

Shcherbakov Park of Culture and Leisure – one of the city's largest and oldest parks, located near the Voroshylovskiy district. It features lakes, pedestrian alleys, attractions, and recreational areas.

The Botanical Garden of Donetsk National University – an important scientific and natural landmark that also serves recreational purposes.

Ivano-Frankivsk. It covers an area of 83.7 km² and has a population of 238,200 people [26]. The calculated area of green areas in the city is 1.4 km², which accounts for 5.88 m² of green space per capita.

The largest and most popular green spaces in the city include [32]:

- Warriors-Internationalists Park. It has a large number of flower plantings and a play area for children.

- Taras Shevchenko Park. Locals call it a museum of nature, because exotic trees and shrubs grow here, which were once brought from nurseries in Poland, France, and America.

- Youth Park. The second largest park in the city, it is a quiet and peaceful place for city residents.

- Railway Station Square. It is located opposite the train station and serves as a place for recreation for guests and residents of the city [23].

Kharkiv. The city has a developed green infrastructure and a large number of green areas. As of 2023, the territory of the city of Kharkiv is 350 km² and the population is 1,421,000 people. The estimated area of green area in the city of Kharkiv is an impressive 37.73 km², which translates into 26.55 m² of green space per inhabitant [3, 16].

There are many parks and squares in Kharkiv that serve as green areas for recreation, leisure and recreation for city residents. The most famous and popular ones are worth highlighting:

- The Central Park of Culture and Recreation is one of the largest and most visited parks in Kharkiv. It includes large green areas, lakes, attractions and well-equipped recreation areas for every taste.

- Taras Shevchenko Garden - located in the heart of the city. The garden features well-maintained alleys, picturesque artificial ponds and cultural and memorial objects.

- Victory Square - located in the northern part of Kharkiv. The square attracts visitors with its wide lawns, playgrounds and cosy atmosphere.

- Sarzhyn Yar is a unique natural green area in the shape of a ravine located in the south-east of Kharkiv. It is a favourite place for walks and outdoor activities, as well as a source of natural mineral water, which is favoured by the city's residents.

The territory of the city of **Kherson** is 65.2 km², with a population of 279,100 inhabitants. The area of

green zones in the city is 1.9 km², which accounts for 6.66 m² of green areas per capita (Table 1).

The green index in the city is as follows:

- Dniprovskiy district 4.20 m²/person (Prydniprovskiy Park; Shumskiy Park);

- Korabelnyi district 1.28 m²/person (Shumenskiy Park; Buzkovyi Hai);

- Suvorovskiy district 6.25 m²/person (Khereson Fortress Park; Park of Glory; Shevchenkiyskiy Park; Monument of landscape art of the Kherson City Lyceum) [46].

The area of **Khmelnitskiy** is 93.05 km². The population is 274,500 people. The area of green zones in the city is 1.102 km², which gives 4.01 m² of green areas per capita (Table 1).

The largest green areas of the city are Mykhailo Chekelan Culture and Recreation Park; Love Island; Taras Shevchenko Square; Ivan Franko Park; Youth Park; Pioneer Square; Square of Sorrow; Podillia Arboretum; Khmelnytskyi National University Botanical Garden; Pivdennyi Buh River Park; and Zarichnia Park [47].

Kropyvnytskyi. The city covers 115 km² and has a population of 219,700 people. The calculated area of green areas in the city is 7 km², which accounts for 31.86 m² of green space per capita.

Parks and squares in Kropyvnytskyi play an important role in improving the quality of life of the local population and creating a pleasant environment for recreation and entertainment. The most favorite green spaces in the city include [35]:

- Central Square. This is perhaps the only place with shade in the central part of the city where all visitors and residents of the city can hide from the heat in summer.

- Cossack Island Park. Located on the left bank of the Ingul River. This magical corner was created in 1937 and is an incredibly picturesque place for residents.

- Victory Park. It is the oldest park in the city, with bicycle paths, outdoor exercise equipment, and a sports ground, and for more than two centuries it has been a place for mass festivities and recreation.

- Dobrudzha forest area. This is one of the most favorite places for students to enjoy the silence and relax in the fresh air among the trees.

Kyiv. The capital of Ukraine is famous for its developed green infrastructure and vast green areas. The territory of the city of Kyiv is 839 km², and the city's population is 2,952,300 people. The calculated area of green spaces in Kyiv is 54.9 km², which translates into 18.6 m² of green space per capita.

There are many large parks and squares in Kyiv that serve as green spaces for the local population and visitors. Some of the largest and most popular green spaces include [33, 34]:

- Holosiivskiy Park: One of the largest parks in

the city, located in the southern part of Kyiv. It serves as an important recreational area for residents and has a large botanical garden.

- Mariinsky Park covers an area of 8.9 hectares and boasts more than 80 species of trees. Exotic plants grow here, such as Amur velvet, Canadian boxwood, Schwedler maple, linden trees, Japanese sophora, and, of course, Kyiv chestnuts.

- Hydropark: Located on an island in the middle part of Dnipro, this park offers large green areas, beaches, and attractions for recreation.

- Taras Shevchenko Square: Located in the central part of the city, this square is one of the most popular green areas for walking and relaxing.

As of 2024, the city of **Luhansk** has an area of 286 km² and a population of 397,700. The city's green areas cover 0.31 km², with a green index of 0.78 m² per capita (Table 1).

The green index is calculated for each district of the city formed by the following objects and is as follows (the toponymy of the city has been preserved in the pre-war period) [36]:

- Artemivskiy district 0.29 m²/person (Heroes of the Great Patriotic War Square; Druzhba Forest Park);

- Zhovtnevyi district 13.33 m²/person (May Day Park; Memory Square; Taras Shevchenko Botanical Garden);

- Kamiano-Bridskiy district 0.72 m²/person (M. Gorky Park of Culture and Recreation; Revolution Square);

- Leninsky district 1.31 m²/person (Park of Glory of Civil War Heroes; Park-Museum of Anthropological Steles and Polovtsian Stone Statues; Young Guard Square).

Lutsk. It has a territory of 42 km² and a population of 216,000 people. The calculated area of green spaces in Lutsk is 2.4 km², which accounts for 11.11 m² of green space per capita.

Among the favorite green areas of this city are [37]:

- Lesia Ukrainka Park. It is located in the very center of the city, has a large number of alleys, ancient trees that serve as protection from the heat in summer.

- Square of the Heroes of the Maidan and the Heavenly Legion. It is a cozy place where locals like to relax.

- Park named after the 900th anniversary of Lutsk. It has a lot of trees and clean air, so it is popular with residents who are actively involved in sports.

- Oak Grove. It is one of the favorite places for recreation, especially in winter, when many children and adults gather to go down the slides.

Lviv. The city has an area of 149.0 km² and a population of 717,300 people. The calculated area of green areas in Lviv is 11.4 km², which accounts for

15.89 m² of green space per capita. Parks and squares are important for recreation for local residents and visitors [3, 38]. The most popular ones in the city are:

- John Paul II Square. It is especially popular with visitors in the spring, as there are more than 120 sakura trees planted here, which bloom in May.

- Stryiskiy Park. It is one of the largest parks in Lviv, with more than two hundred species of plants, and is of great historical value to the locals.

- High Castle. The park includes Castle Hill, where the remains of the historic "High Castle" are located, and gathers a large number of tourists who can enjoy the panoramas of the city.

- Park Znesennya. It is ideal for cycling, skiing in winter, and hiking for residents and tourists alike [38].

As of 2023, the population of **Mykolaiv** is 470,000 people, and the city covers 260 km². The area of green areas is 1.6 km², which is 3.3 m² per capita.

The green index for each district of the city is formed by such green areas and is as follows:

- Zavodskiy district 4.03 m²/person (Lexi Park; Young Heroes Park; Skazka Children's Garden; Council of Europe Square);

- Ingulskiy district 2.68 m²/person (Yunist Park; Zoological Park; St. Nicholas Square);

- Korabelnyi district 0.63 m²/person (Korabelnyi Park; Druzhba Park; Soldier Square; Bohoyaslovskiy Park; Sosnovyi Forest Park);

- Central district 3.51 m²/person (Sixty-eight Paratroopers Square; Victory Park; People's Garden; Chestnut Square; Taras Shevchenko Park) [39].

Odesa. It covers an area of 162.4 km² and has a population of 1010.5 people. The calculated area of green areas in the city of Odesa is 2.9 km², which accounts for 2.87 m² of green space per capita.

The largest and most popular green areas in the city include [40]:

- Shevchenko Park: Located in the central part of the city, this park is one of the largest and oldest green spaces. It offers beautiful alleys, cascades of fountains and a fabulous landscape.

- Botanical Garden of Odesa University: This botanical garden impresses with its variety of plants and exotic species.

- Park of Glory: Located on the Black Sea coast, it offers great views, sea breezes, and places to relax.

- Leonid Utesov Square: Known for its architectural beauty and cultural events.

Poltava. The city covers an area of 112 km² and has a population of 279,600 people. The calculated area of green areas in the city is 1 km², which accounts for 3.58 m² of green space per capita.

This city does not have a large amount of green infrastructure, but the most popular among them are

the following [41]:

- Birch Square. Located in the very center of the city, it got its name because of the species composition of the trees that dominate it, and it is one of the most picturesque and pleasant streets for walking.
- The Corps Garden. There are about 70 species of trees and shrubs here, with flower beds of peonies and roses and other flowers. There are many rare species of trees.
- Victory Park. Folk festivals are often organized on its territory, and there are waterfalls and outdoor tennis courts.
- The park on the estate of Mr. Myrnyi. It preserves trees and bushes planted by the writer, as well as three hundred-year-old oaks on the bank of the pond.

Rivne. As of 2023, it has an area of 64 km² and a population of 243,900 people. Green areas in the city cover 7.13 km², which corresponds to 29.23 m² of green space per capita.

In the city of Rivne, there are parks and squares that serve an important function of green spaces for local residents and visitors. Among the largest and most favorite green areas are [42]:

- Yubileiny Park. A wonderful green area of the city, where residents love to spend time, is replenished with new entertainment areas every year.
- Taras Shevchenko Park. It is conditionally divided into 5 zones: quiet recreation, active recreation, entertainment facilities, sports and children's sector.
- Lebedynka Park. One of the most favorite places for recreation for local residents.
- Hoshcha Park. One of the 5 oldest parks in Ukraine, its greatest value is rare tree species brought here from many countries of the southern hemisphere.

Simferopol covers an area of 107 km² and has a population of 338,300 people. The calculated area of green zones is 2.04 km², which accounts for 6.02 m² of green areas per capita (Table 1). The green index in the city is formed by various parks [43] and is as follows:

- Railway District 5.91 m²/person (Yuri Gagarin Park; Soldiers of Internationalists Square; Heroes of Social Work Square; Victory Square; Vladimir Vysotsky Square; St. Luke of Crimea Square);
- Central district 0.54 m²/person (Trenov Park; Catherine's Garden Park; Salgirka Park; Taras Shevchenko Park; Seminarsky Square);
- Kyivskyi district 0.62 m²/person (Children's Park; Peace Square; Simferopol Arboretum; Hryhorii Potemkin Square) (place names have been preserved since the pre-war period).

The territory of the city of **Sumy** is 95.0 km², with a population of 256,500 people. The calculated area of green areas in Sumy is 0.7 km², which accounts for 2.73 m² of green space per capita.

Among the most popular green places for recreation in this city are the following [44]:

- Kozhedub Park. It serves as a cultural recreation for residents and guests of the city, and includes more than 30 types of green spaces.
- Druzhba Square. This is a cozy place with wide alleys, which include both ordinary trees and exotic ones.
- Veretenivskyi Park. There are many trees here that are more than 100 years old, there is also a healing spring, and many wild animals have found refuge in the park.
- Taras Shevchenko Square. You can often meet elderly people playing chess, young people just walking around, and children feeding the permanent residents of the park, a great place to relax.

Ternopil. It has a city area of 86 km² and a population of -225,000 people. The calculated area of green areas in the city is 8.9 km², which is 39.56 m² of green space per capita.

Parks and squares play a significant role in creating green spaces for the use of the local population and visitors [3]. Some of the largest and most popular green spaces include:

- Park Zdorovye. One of the youngest parks in Ternopil, founded in 2000, it has only one main alley with 6 smaller ones branching off.
- Savych Park. Pupils of the Extreme Sports School train there. The ski season lasts, depending on weather conditions, from December to March.
- Old Park. It is the oldest park in Ternopil, has a large number of green spaces, and is therefore popular with locals and visitors.
- Kobzar Square. This is a cozy place in the heart of Ternopil where you can enjoy the natural tranquility and walk among the greenery.

Uzhhorod. As of 2023, the city's territory is 60 km², and the city's population is -115,400 people. The calculated area of green spaces in Uzhhorod is 15.7 km², which accounts for 136.05 m² of green space per capita.

There are many large parks and squares in Uzhhorod that serve as green spaces for the local population and visitors. Some of the largest and most popular green spaces include [45]:

- Bozdosh Park. There are equipped picnic areas and a spring with delicious mineral water. A large part of the territory goes to the river bank.
- Pidzamkovy Park. It has a surprisingly rich history, dating back to the 16th century, and is a great place for residents and tourists to relax.
- Loudon Arboretum. It is located within the city limits and is now one of the most attractive and prominent landmarks in the city.
- T. G. Masaryk Park. The park itself belongs to the nature reserve fund, with more than 20 species of trees of various origins, including those over 60

years old.

Vinnitsia has an area of 113 km² and a population of 369.7 thousand people. The calculated area of the city's green zones is 1.55 km², which is 4.19 m² of green space per capita (Table 1).

The green index in each district of the city is:

- Central district 6.64 m²/person, which is formed by such areas as Leontovych Central Park, the Botanical Garden of Vinnitsia State Agrarian University, Vinnitsia Forest Park);

- Zamostianskyi district 0.44 m²/person - green areas of the Park Khimikiv and the Park Zelena Poliana;

- Starohradskyi district 4.02 m²/person (Sabarovskiy Park; Ancient Park; Vyshnevyi Park) [28].

Zaporizhzhia. It covers an area of 334 km² and has a population of -710,100 people. The calculated area of green areas in Zaporizhzhia is 5.0 km², which accounts for 7.0 m² of green space per capita.

Among the largest and most recognizable green areas in the city are the following [31]:

- Oak Grove Park. The central park of culture and recreation of the city. It is one of the most environmentally friendly places, especially crowded on weekends.

- Shevchenko Park. It is a wonderful green place for recreation, has a fairly large territory, a large number of places where residents can relax.

- Victory Park. It is considered the largest park in the city and attracts visitors with its cultural sites and historical monuments.

- Voznesenivskiyi Park. It has an incredible combination of hills, well-groomed paths, picturesque flower arrangements and lakes, and every year it hosts large-scale fairs.

The city of **Zhytomyr** has an area of 65 km² and a population of 261600 people. The area of green areas of the city is 2.29 km², which is 8.75 m² of green space per capita (Table 1).

The green index in the city districts is:

- Bohunsky district 7.06 m²/person (Kroshensky Square; Botanical Garden of Zhytomyr National Agroecological University; Park of Glory; Park of the Thirtieth Anniversary of Victory);

- Korolevskiyi district 10.96 m²/person (Lyatoshynskiyi Square; Park of Culture and Recreation "Renaissance"; Smokovskyi Park; Korbutovskyi Hydropark) [30].

In general, the average indicator of housing provision for the population of Ukraine's regional centres was calculated to be 16 m² per capita (Table 1), which is significantly lower than the European norm. This indicates insufficient work in this area by municipal services. When planning the development of green infrastructure in cities, it should be understood that the formation of green areas is influenced by the ratio of built-up and open urban

areas. Other important factors in the formation of green areas are the natural features of the areas in each city: climate, relief, vegetation, soil fertility, water bodies, as well as temperature and wind conditions, wind speed, precipitation, etc. At the same time, some cities that have more favourable conditions for vegetation development, as evidenced by the indicator of total forest cover in the region (Fig. 2), do not use the natural potential and do not develop green spaces. We are talking primarily about Chernivtsi, Zhytomyr, Ivano-Frankivsk, where the green space is much lower than the recommended European norm of 20 m² per person. As for such steppe cities as Kropyvnytskyi and Donetsk, their green space is even higher than the European norm.

The degree of influence of various factors on each case of greening may differ. Special attention is given to the comprehensive assessment of the state of the natural environment. In today's world, free spaces in Ukrainian cities are increasingly occupied by new buildings, but along with this, the need for park areas is also growing. Every week, the urban population continues to grow, while green spaces remain unchanged. As the population increases, so does the need for green areas for recreation, sports, leisure, and maintaining ecological balance.

Strengthening green infrastructure strategies in Ukrainian cities is a key aspect of sustainable development, improving the quality of life, and reducing environmental impact. Specific recommendations for the effective implementation of such a strategy include:

Analysis and zoning:

- Conduct a detailed analysis of the city's environmental condition, identifying areas with the highest levels of pollution and the lowest levels of greenery.

- Develop a zoning plan to identify locations where the enhancement of green infrastructure is most needed.

Creation of new green areas:

- Launch programs to create new parks, squares, and forest parks, especially in parts of the city lacking green spaces.

- Ensure accessibility of new green areas for various population groups and adapt them to the needs of people with disabilities.

Ecological architecture and landscaping:

- Promote green technologies and energy efficiency standards in both new and existing buildings.

- Implement green roofs, green facades, and eco-friendly parking solutions.

Development of urban gardens and vegetable plots:

- Launch initiatives to develop community gardens and urban farms, which not only provide food but also support biodiversity and enhance the urban landscape.

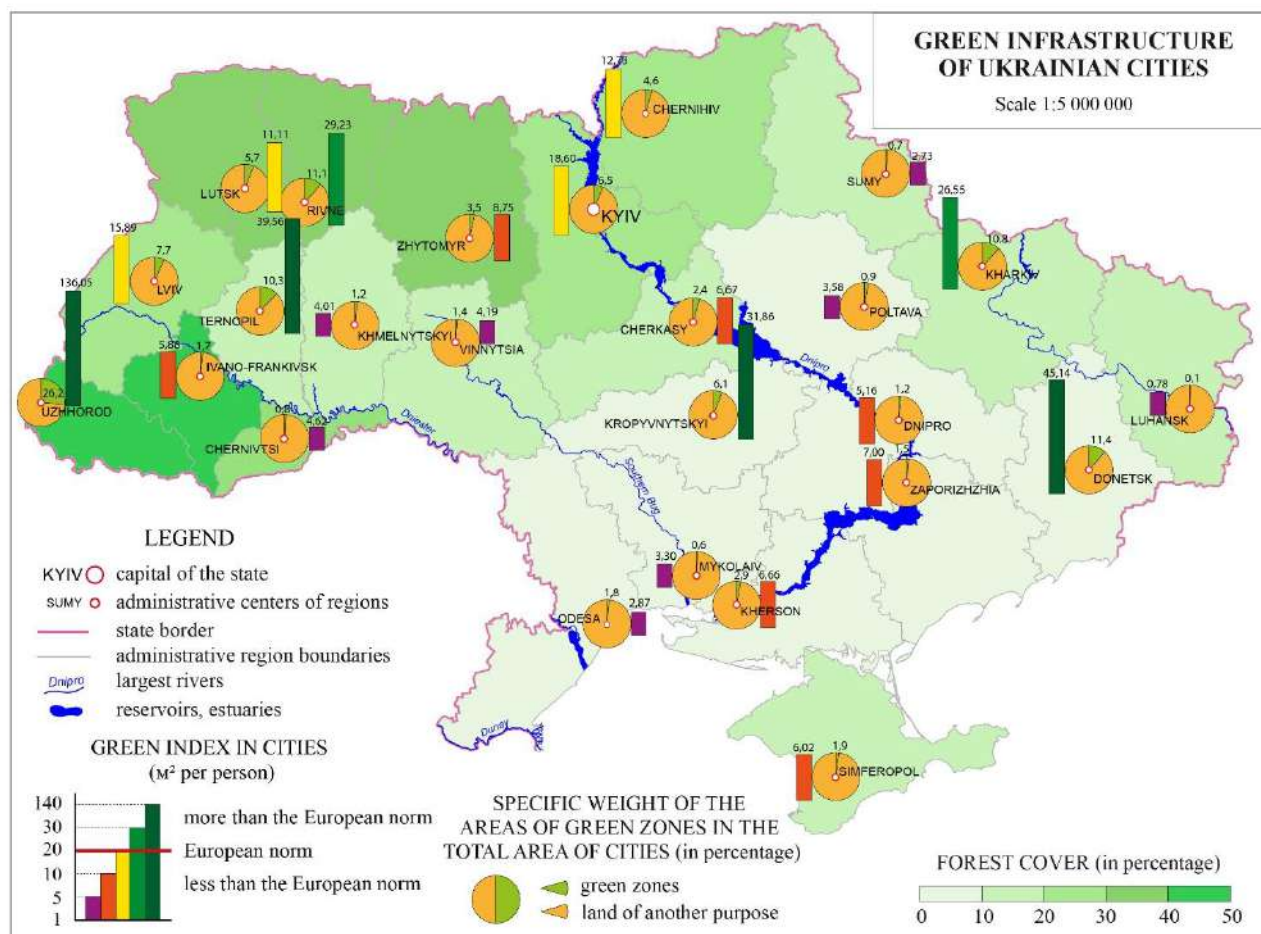


Fig. 2. Green infrastructure of Ukrainian cities

Bicycle and pedestrian routes:

- Develop and expand existing networks of bicycle and pedestrian paths, promoting reduced car usage and improved urban mobility.

- Ensure safe crossings, such as green bridges.

Support for innovation and technology:

- Use information technologies to monitor the state of green infrastructure and improve its management.

- Engage startups and tech companies in developing innovative solutions for green infrastructure.

Community involvement:

- Support and encourage public participation in decision-making on green infrastructure development.

- Organize community events, volunteer programs, and educational initiatives to foster environmentally conscious behavior among citizens.

Awareness and education:

- Conduct awareness campaigns and educational events highlighting the benefits of green infrastructure.

- Create public information resources providing access to data on the condition and development of the city's green zones.

- These recommendations should serve as a foundation for developing targeted strategies for the implementation of green infrastructure in Ukrainian cities, taking into account their specific features and needs.

Conclusions. Overall, the comparison of green spaces in different cities showed that there is considerable variation in their number and location. Given the importance of green spaces for the health and well-being of the population, further development and maintenance of green spaces is essential to improve the quality of life in cities. Green spaces in cities play an important role in improving the quality of life of residents. They provide recreational areas, improve air quality, and reduce noise and stress. Green spaces also contribute to the physical and psychological health of the population. Given the importance of green spaces for urban livability, it is important to pay attention to preserving and expanding such spaces in cities. This can include preserving existing parks, gardens and forests, creating new green spaces and integrating green elements into urban planning.

The geographical analysis based on geodata and indices allowed us to assess the state of green areas

in cities, identify the lack of green areas, and decide on the necessary measures to increase and improve green space.

1. The provision of green infrastructure in Ukrainian cities does not depend on natural areas or the overall leafiness of the region. The main factor in the development of urban green infrastructure is the work of local utility organisations.

2. According to the results of the analysis, the cities with the best green infrastructure are Uzhhorod, Donetsk, Ternopil, Kropyvnytskyi, Rivne and Kharkiv, where the green indices are 136, 45, 39, 31, 29 26. This indicates that cities are actively working to preserve green areas and create comfortable environmental conditions for residents.

3. On the other hand, in cities such as Luhansk (0.78), Sumy (2.73), Odesa (2.87), Mykolaiv (3.3), and Poltava (3.58), the area of green areas reaches

catastrophic levels. They are more than 5 times behind the average European standards.

The overall conclusion is that the state of green infrastructure in Ukrainian cities is diverse and requires attention at different levels. Cities that are leading the way in creating and maintaining green spaces show that it is possible and contribute to improving the quality of life of their residents. At the same time, cities with an insufficient amount of green space lag behind the standards, which can have a negative impact on health and the overall state of the urban environment.

For the development of green infrastructure in cities, it is advisable to use both the experience of Ukrainian and European cities [3, 51], where various options are successfully implemented in view of the possibility of renewing the existing urban space.

Bibliography

1. Lu, J., Ren, L., Zhang, C., Liang, M., Stasiulis, N., & Streimikis, J. (2020). Impacts of feminist ethics and gender on the implementation of CSR initiatives. *Filosofija-Sociologija*, 31(1), 24–33.
2. Федонюк, М. А., Прохоренко, А. Ю., Федонюк, В. В. (2018). Дослідження формування та просторового розподілу «острова тепла» над Луцьком. *Екологічні нотатки*, 6, 45–53.
3. Зелено-блакитна інфраструктура в містах пострадянського простору: вивчення спадщини та підключення до досвіду країн V4 : колективна монографія. – Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2022. – 400 с. <https://ekhnuir.karazin.ua/handle/123456789/18778>
4. Apostolopoulou, E., & Adams, W. M. (2015). Neoliberal capitalism and conservation in the post-crisis era: The dialectics of “green” and “un-green” grabbing in Greece and the UK. *Antipode*, 47(1), 15–35. <https://doi.org/10.1111/anti.12102>
5. Цілі сталого розвитку. (б. д.). UNDP. <https://www.undp.org/uk/ukraine/tsili-staloho-rozvytku>
6. Максименко, Н. В., Бурченко, С. В. (2019). Теоретичні основи стратегії зеленої інфраструктури: міжнародний досвід. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*, 31 (31), 16–25. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2019-31-02>
7. Jun Ying, Xiaojing Zhang, Yiqi Zhang & Svitlana Bilan (2022) Green infrastructure: systematic literature review, *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 35:1, 343–366, DOI: <https://doi.org/10.1080/1331677X.2021.1893202>
8. Lovell, S.T., Taylor, J.R. (2013). Supplying urban ecosystem services through multifunctional green infrastructure in the United States. *Landscape Ecol*, 28, 1447–1463 <https://doi.org/10.1007/s10980-013-9912-y>
9. Naumann, S.; Davis, M.; Kaphengst, T.; Pieterse, M.; Rayment, M. Design, Implementation and Cost Elements of Green Infrastructure Projects; European Commission: Brussels, Belgium, 2011
10. Green Infrastructure (GI) – Enhancing Europe’s Natural Capital. (2013). European Commission: Brussels, Belgium.
11. Green Infrastructure Guidance. Natural England, Sheffield (2009). URL: https://water.rutgers.edu/Green_Infrastructure_Guidance_Manual/2016-08-10_REV1
12. Hoover, F.-A., Meerow, S., Coleman, E., Grabowski, Z., & McPhearson, T. (2023). Why go green? Comparing rationales and planning criteria for green infrastructure in U.S. city plans. *Landscape and Urban Planning*, 237, 104781. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104781>
13. Anguelovski, I., Connolly, J. J., Garcia-Lamarca, M., Cole, H., & Pearsall, H. (2019). New scholarly pathways on green gentrification: What does the urban ‘green turn’ mean and where is it going? *Progress in Human Geography*, 43(6), 1064–1086. <https://doi.org/10.1177/0309132518803799>
14. Liu, H., Kong, F., Yin, H., Middel, A., Zheng, X., Huang, J., Xu, H., Wang, D., & Wen, Z. (2021c). Impacts of green roofs on water, temperature, and air quality: A bibliometric review. *Building and Environment*, 196, 107794. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107794>
15. Hrechko, A. A. (2022). Experience and benefits of using green roofs as an element in green infrastructure. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University Series «Ecology»*, (26), 32–42. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2022-26-03>
16. Maksymenko, N., Burchenko, S., Hrechko, A. & Sonko, S. (2023). Carbon sequestration and provision of green infrastructure in the Ukrainian cities of Kharkiv and Chuhuiv in the context of post-war reconstruction. *Acta Horticulturae et Regiotecturae*, 26, 2, 90–98. <https://doi.org/10.2478/ahr-2023-0013>
17. The 5 Principles of Green Economy. (б. д.). Green Economy Coalition. <https://www.greeneconomycoalition.org/news-and-resources/the-5-principles-of-green-economy>

18. Communication from the commission to the European Parliament. The European Green Deal. Brussels, 11.12.2019.COM/2019/640. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52019DC0640>
19. Ачасова А. О. та Ачасов А. Б. (2024). Європейська зелена угода та перспективи для України. Людина та довкілля. Проблеми неоекології, (41), 33-56. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2024-41-03>
20. Jayasooriya, V.M., Ng, A.W.M. (2014). Tools for Modeling of Stormwater Management and Economics of Green Infrastructure Practices: a Review. Water Air Soil Pollut 225, 2055 <https://doi.org/10.1007/s11270-014-2055-1>
21. Гречко, А. А., Максименко, Н. В., Шкаруба, А. Д., & Кутузов, Є. О. (2024). Біорізноманіття рослин приміських луків для створення міських газонів з польовими квітами. Людина та довкілля. Проблеми неоекології, (41), 100-111. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2024-41-07>
22. Rietz, A. (2023). Wildlife-vehicle collisions : An evaluation of the mitigation effect by ecoducts and fauna bridges in Sweden (Dissertation). Retrieved from <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:umu:diva-210874>
23. Afaq, H., Chambers, D.N., Zolnikov, T.R. (2022). Urban Heat Islands. In: Brears, R.C. (eds) The Palgrave Encyclopedia of Urban and Regional Futures. Palgrave Macmillan, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87745-3_339
24. Кицюк, І., Науменко, Н., & Присяжнюк, В. (2023). Європейський зелений курс: можливості та наслідки для українського бізнесу. Економіка та суспільство, (56). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-56-87>
25. Картографічний сервіс Google- Планета Земля. URL: <https://earth.google.com/web/>
26. Чисельність населення по містах України. Мінфін. URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/reference/people/town/>
27. Міста України за площею. INSIDE-UA. URL: <https://inside-ua.com/cities/by-area>
28. Зелені зони Вінниці. Our-Travel.info. URL: <https://our-travels.info/ost/Goroda/Ukraine/Vinnica/Vinnica-park.php>
29. Дніпровська міська рада. URL: <https://dniprorada.gov.ua/uk/articles/item/38637/u-dnipri-stvorili-mapu-zdorovogo-ta-bezpechnogo-vidpochinku>
30. Парки культури та відпочинку у Житомирі. zt.locator.ua. URL: <https://zt.locator.ua/zhytomyr/parky/ru/>
31. Парки Запоріжжя. URL: <https://zaporizhzhia.city/news/parki-zaporizha#>
32. Парки та сквери Івано - Франківська. URL: <https://typical.if.ua/parky-ta-skvery-ivano-frankivska-foto>
33. УНІАН Інформаційне Агенство. Найкращі парки Києва. URL: <https://www.unian.ua/tourism/lifehacking/naykrashchi-parki-kiyeva-2020-spisok-parkiv-kiyeva-z-foto-novini-kiyeva-10991135.html>
34. Екополітика. Екологічна стратегія Києва 2030. URL: <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/kiivrada-vpershe-zatverdila-ekologichnu-strategiju-mista-do-2030-roku/>
35. Сквери та парки: 10 місць, де можна сховатися від спеки в Кропивницькому. URL: <https://dostyp.com.ua/novini/skvieri-ta-parki-10-mists-die-mozhna-skhovatisia-vid-speki-v-kropivnitskomu>
36. Парки Луганська. URL: <https://lugansk.wiki/places/parki/>
37. Скільки в Луцьку зелених зон: перелік. URL: <https://konkurent.ua/publication/14969/skilki-v-lucku-zelenih-zon-perelik>
38. Maksymenko N., Shpakivska I., Burchenko S., Utkina K. Green Infrastructure in Lviv - example of park zones / Acta Horticulturae et Regiotecturae. Slovak University of Agriculture in Nitra. 25, 2022(1): 37-43. <https://doi.org/10.2478/ahr-2022-0005>
39. Зелена інфраструктура Миколаїв. IGo.World.com. URL: https://ua.igotoworld.com/ua/poi_catalog/399136-134-parks-gardens-mykolaiv.htm#google_vignette
40. Одеська міська рада. URL: <https://omr.gov.ua/ru/acts/council/22345/>
41. Інтернет- видання Полтавщина. URL: <https://poltava.to/news/64809/>
42. Рівне Медіа. URL: <https://rivne.media/news/shcho-podivitisya-u-rivnomu-top10-tsikavikh-mists-dlya-znayomstva-z-mistom-44148>
43. Парки культури та відпочинку у Сімферополі. Bebeska. URL: <https://cr.bebeska.info/simferopol/parki-kultury-i-otdyha/>
44. Парки та сквери міста Суми. Visit.Sumy. URL: <https://visit.sumy.ua/parki-i-skveri/>
45. Туризм Закарпаття. URL: <https://tourinform.org.ua/parky-ta-skvery-uzhgorodskogo-rajonu>
46. Парки та сади Херсону. IGo.World.com. URL: https://ua.igotoworld.com/ru/poi_catalog/391215-134-parks-gardens-kherson.htm
47. Зелені зони міста Хмельницький. Our-Travel.info. URL: <https://our-travels.info/ost/Goroda/Ukraine/Hmelniyski/Hmelniyski-park.php?ysclid=lj77i81ipw344211202>
48. Черкаська обласна державна адміністрація. URL: <https://ck-oda.gov.ua/novyny-cherkaskoyi-oblasti/nacherkashhini-vidkrili-23-aktivni-parki/>
49. Зелені насадження Чернівців. Парки та сквери. Chernivtsi Online. URL: <https://chernivtsi-online.net/places/sights/parks/>
50. Природні зони Чернігова. nationalparks.in.ua. URL: <https://www.nationalparks.in.ua/pryrodni-parky/chernigiv/>
51. Maksymenko N. V., Bihunová M Green innovations in urban landscape: opportunities to use Slovakia's experience. Людина та довкілля. Проблеми неоекології. 2024. Вип. 42. С. 95-112. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2024-42-07>

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

References

1. Lu, J., Ren, L., Zhang, C., Liang, M., Stasiulis, N., & Streimikis, J. (2020). Impacts of feminist ethics and gender on the implementation of CSR initiatives. *Filosofija-Sociologija*, 31(1), 24–33.
2. Fedoniuk, M. A., Prokhorenko, A. Y., Fedoniuk, V. V. (2018). Study of the formation and spatial distribution of the "heat island" over Luts'k. *Ecological Notes*, 6, 45–53. [in Ukrainian]
3. Green & Blue infrastructure in post-USSR cities: exploring legacies and connecting to V4 experience: collective monograph. Ed. by N.V. Maksymenko, A.D. Shkaruba (2022). Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University, 400. <https://ekhnuir.karazin.ua/handle/123456789/18778> [in Ukrainian]
4. Apostolopoulou, E., & Adams, W. M. (2015). Neoliberal capitalism and conservation in the post-crisis era: The dialectics of "green" and "un-green" grabbing in Greece and the UK. *Antipode*, 47(1), 15–35. <https://doi.org/10.1111/anti.12102>
5. What are the Sustainable Development Goals? UNDP. <https://www.undp.org/ukraine/sustainable-development-goals>
6. Maksymenko, N. V., & Burchenko, S. V. (2019). Theoretical Basis of the Green Infrastructure Strategy: International Experience. *Man and Environment. Issues of Neoeology*, 31(31), 16–25. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2019-31-02> [in Ukrainian]
7. Jun Ying, Xiaojing Zhang, Yiqi Zhang & Svitlana Bilan (2022). Green infrastructure: systematic literature review, *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 35:1, 343–366, DOI: <https://doi.org/10.1080/1331677X.2021.1893202>
8. Lovell, S.T., Taylor, J.R. (2013). Supplying urban ecosystem services through multifunctional green infrastructure in the United States. *Landscape Ecol*, 28, 1447–1463 <https://doi.org/10.1007/s10980-013-9912-y>
9. Naumann, S.; Davis, M.; Kaphengst, T.; Pieterse, M.; Rayment, M. (2011). *Design, Implementation and Cost Elements of Green Infrastructure Projects*; European Commission: Brussels, Belgium.
10. Green Infrastructure (GI) –Enhancing Europe's Natural Capital. (2013). European Commission: Brussels, Belgium.
11. Green Infrastructure Guidance. Natural England, Sheffield (2009). URL: https://water.rut-gers.edu/Green_Infrastructure_Guidance_Manual/2016-08-10_REV1
12. Hoover, F.-A., Meerow, S., Coleman, E., Grabowski, Z., & McPhearson, T. (2023). Why go green? Comparing rationales and planning criteria for green infrastructure in U.S. city plans. *Landscape and Urban Planning*, 237, 104781. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104781>
13. Anguelovski, I., Connolly, J. J., Garcia-Lamarca, M., Cole, H., & Pearsall, H. (2019). New scholarly pathways on green gentrification: What does the urban 'green turn' mean and where is it going? *Progress in Human Geography*, 43(6), 1064–1086. <https://doi.org/10.1177/0309132518803799>
14. Liu, H., Kong, F., Yin, H., Middel, A., Zheng, X., Huang, J., Xu, H., Wang, D., & Wen, Z. (2021c). Impacts of green roofs on water, temperature, and air quality: A bibliometric review. *Building and Environment*, 196, 107794. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107794>
15. Hrechko, A. A. (2022). Experience and benefits of using green roofs as an element in green infrastructure. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University Series «Ecology»*, (26), 32–42. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2022-26-03>
16. Maksymenko, N., Burchenko, S., Hrechko, A. & Sonko, S. (2023). Carbon sequestration and provision of green infrastructure in the Ukrainian cities of Kharkiv and Chuhuiv in the context of post-war reconstruction. *Acta Horticulturae et Regiotecturae*, 26, 2, 90–98. <https://doi.org/10.2478/ahr-2023-0013>
17. The 5 Principles of Green Economy. Green Economy Coalition. <https://www.greenconomycoalition.org/news-and-resources/the-5-principles-of-green-economy>
18. Communication from the commission to the European Parliament. The European Green Deal. Brussels, 11.12.2019.COM/2019/640. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52019DC0640>
19. Achasova, A. O., & Achasov, A. B. (2024). The European Green Deal and prospects for Ukraine. *Man and Environment. Issues of Neoeology*, (41), 33–56. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2024-41-03> [in Ukrainian]
20. Jayasooriya, V.M., Ng, A.W.M. (2014). Tools for Modeling of Stormwater Management and Economics of Green Infrastructure Practices: a Review. *Water Air Soil Pollut* 225, 2055 <https://doi.org/10.1007/s11270-014-2055-1>
21. Hrechko, A. A., Maksymenko, N. V., Shkaruba, A. D., & Kutuzov, Y. O. (2024). Biodiversity of plants in suburban meadows to create urban lawns with wildflowers. *Man and Environment. Issues of Neoeology*, (41), 100–111. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2024-41-07> [in Ukrainian]
22. Rietz, A. (2023). Wildlife-vehicle collisions : An evaluation of the mitigation effect by ecoducts and fauna bridges in Sweden (Dissertation). Retrieved from: <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:umu:diva-210874>
23. Afaq, H., Chambers, D.N., Zolnikov, T.R. (2022). Urban Heat Islands. In: Brears, R.C. (eds) *The Palgrave Encyclopedia of Urban and Regional Futures*. Palgrave Macmillan, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87745-3_339
24. Kytsyuk, I., Naumenko, N., & Prysiashniuk, V. (2023). European Green Deal: Opportunities and Consequences for Ukrainian Business. *Economy and Society*, (56). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-56-87> [in Ukrainian]
25. Google Earth mapping service. URL: <https://earth.google.com/web/>
26. Population by city in Ukraine. Ministry of Finance. URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/reference/people/town/> [in Ukrainian]
27. Ukrainian cities by area. INSIDE-UA. URL: <https://inside-ua.com/cities/by-area> [in Ukrainian]
28. Green areas of Vinnytsia. Our-Travel.info. URL: <https://our-travels.info/ost/Goroda/Ukraine/Vinnica/Vinnica-park.php> [in Ukrainian]

29. Dnipro City Council. URL: <https://dniprorada.gov.ua/uk/articles/item/38637/u-dnipro-stvorili-mapu-zdorovogo-ta-bezpechnogo-vidpochinku> [in Ukrainian]
30. Parks of culture and recreation in Zhytomyr. *zt.locator.ua*. URL: <https://zt.locator.ua/zhytomyr/parky/ru/> [in Ukrainian]
31. Zaporizhzhia parks. URL: <https://zaporizhzhia.city/news/parki-zaporizza#> [in Ukrainian]
32. Parks and squares of Ivano-Frankivsk. URL: <https://typical.if.ua/parky-ta-skvery-ivano-frankivska-foto> [in Ukrainian]
33. UNIAN Information Agency. The best parks in Kyiv. URL: <https://www.unian.ua/tourism/lifehacking/naykrashchi-parki-kiyeva-2020-spisok-parkiv-kiyeva-z-foto-novini-kiyeva-10991135.html> [in Ukrainian]
34. Environmental policy. Kyiv Environmental Strategy 2030. URL: <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/kiivrada-vpershe-zatverdila-ekologichnu-strategiju-mista-do-2030-roku/> [in Ukrainian]
35. Squares and parks: 10 places to hide from the heat in Kropyvnytskyi. URL: <https://dostyp.com.ua/novini/skvieri-ta-parki-10-mists-die-mozhna-skhovatisia-vid-spieki-v-kropivnits-komu-foto/> [in Ukrainian]
36. Parks of Luhansk. URL: <https://lugansk.wiki/places/parki/> [in Ukrainian]
37. How many green areas are there in Lutsk: a list. URL: <https://konkurent.ua/publication/14969/silki-v-lucku-zelenih-zon-perelik/> [in Ukrainian]
38. Maksymenko N., Shpakivska I., Burchenko S., Utkina K. Green Infrastructure in Lviv - example of park zones / *Acta Horticulturae et Regiotecturae*. Slovak University of Agriculture in Nitra. 25, 2022(1): 37–43. <https://doi.org/10.2478/ahr-2022-0005>
39. Green infrastructure in Mykolaiv. *IGo.World.com*. URL: https://ua.igotoworld.com/ua/poi_catalog/399136-134-parks-gardens-mykolaiv.htm#google_vignette [in Ukrainian]
40. Odesa City Council. URL: <https://omr.gov.ua/ru/acts/council/22345/> [in Ukrainian]
41. Online publication *Poltavshchyna*. URL: <https://poltava.to/news/64809/> [in Ukrainian]
42. Rivne Media. URL: <https://rivne.media/news/shcho-podivitisya-u-rivnomu-top10-tsikavikh-mists-dlya-znayomstva-z-mistom-44148> [in Ukrainian]
43. Parks of culture and recreation in Simferopol. *Bebeshka*. URL: <https://cr.bebeshka.info/simferopol/parki-kultury-i-otdyha/> [in Ukrainian]
44. Parks and squares of the city of Sumy. *Visit.Sумы*. URL: <https://visit.sumy.ua/parki-i-skveri/> [in Ukrainian]
45. Tourism in Transcarpathia. URL: <https://tourinform.org.ua/parky-ta-skvery-uzhgorodskogo-rajonu> [in Ukrainian]
46. Parks and gardens of Kherson. *IGo.World.com*. URL: https://ua.igotoworld.com/ru/poi_catalog/391215-134-parks-gardens-kherson.htm [in Ukrainian]
47. Green areas of Khmelnytskyi city. *Our-Travel.info*. URL: <https://our-travels.info/ost/Goroda/Ukraine/Hmelnitski/Hmelnitski-park.php?ysclid=lj77i81ipw344211202> [in Ukrainian]
48. Cherkasy Regional State Administration. URL: <https://ck-oda.gov.ua/novyny-cherkaskoyi-oblasti/na-cherkashhini-vidkrili-23-aktivni-parki/> [in Ukrainian]
49. Green spaces in Chernivtsi. Parks and squares. *Chernivtsi Online*. URL: <https://chernivtsi-online.net/places/sights/parks/> [in Ukrainian]
50. Natural zones of Chernihiv. *nationalparks.in.ua*. URL: <https://www.nationalparks.in.ua/pryrodni-parky/chernigiv/> [in Ukrainian]
51. Maksymenko, N. V., & Bihuňová, M. (2024). Green innovations in urban landscape: opportunities to use Slovakia's experience. *Man and Environment. Issues of Neoecology*, (42), 95–112. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2024-42-07>

Зелена інфраструктура міст України в контексті Європейського зеленого курсу

Надія Максименко¹

д. геогр. н., професор, завідувач кафедри екологічного моніторингу та заповідної справи,
¹ Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, Україна;

Віліна Пересадько¹

д. геогр. н., професор, кафедра фізичної географії та картографії;

Аліна Гречко¹

викладач кафедри екологічного моніторингу та заповідної справи;

Світлана Бурченко¹

д. філософії (Науки про Землю), доцент кафедри екологічного моніторингу та заповідної справи;

Анна Скриган²

к. геогр. н., доцент з екології;

² Erda Research, Technology, Education; Гаага, Нідерланди

Зростання урбанізації, зміни клімату та екологічні виклики підкреслюють важливість порівняльної оцінки забезпеченості зеленою інфраструктурою міст України для покращення якості міського середовища та життя громадян. Проведення порівняльної оцінки забезпеченості зеленою інфраструктурою обласних центрів України дозволить виявити рівень розвитку зелених зон у кожному місті, визначити їхні поточні проблеми та потенціал для

подальшого розвитку. Такий аналіз надасть можливість місцевим органам влади та розробникам політик вжити необхідних заходів для поліпшення стану зеленої інфраструктури та збільшення її доступності для всіх жителів міст. Мета статті – визначити особливості формування та функціонування зеленої інфраструктури (ЗІ) в містах-обласних центрах України, порівняти забезпеченість населення зеленими зонами у різних адміністративних одиницях цих міст. Для отримання статистичної інформації про населення кожного району міста та площу окремих зелених ділянок був використаний метод статистичного аналізу та дешифрування матеріалів дистанційного зондування. Для цього використовувались супутникові знімки з картографічного сервісу Google- Планета Земля. Математичні обчислення проводилися відповідно до методики розрахунку загальноприйнятого Зеленого індексу, що визначався як співвідношення між площею району (міста) та кількістю його мешканців. Створено банк даних щодо площі зелених зон в містах України. Розраховано зелені індекси по районах кожного міста та зроблено аналіз складових зелених зон в кожному з районів. Створено картографічні моделі просторового розподілу зеленої інфраструктури по обласних центрах на тлі природної лісистості територій. Зроблено порівняння забезпеченості міст України зеленою інфраструктурою та визначено шляхи покращення ситуації. В цьому дослідженні вперше узагальнено матеріал по всіх обласних центрах України стосовно забезпеченості населення зеленою інфраструктурою, обраховано зелені індекси, проведено просторовий аналіз та розроблено відповідні рекомендації.

Ключові слова: Зелена інфраструктура, Зелений індекс, райони, зелені зони, зелені коридори, міський ландшафт, Європейський зелений курс, картографічна модель.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 24 березня 2025 р.

Прийнята 9 травня 2025 р.

Оцінка техногенного навантаження від місць захоронення твердих побутових відходів з використанням просторово-часових індикаторів

Вероніка Приходько¹

к. геогр. н., доцент, кафедра екології та охорони довкілля,

¹ Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, Одеса, Україна,

e-mail: vks26@ua.fm,  <https://orcid.org/0000-0003-3854-6693>;

Тамерлан Сафранов¹

д. г.-м. н., професор, кафедра екології та охорони довкілля,

e-mail: safranov@ukr.net,  <https://orcid.org/0000-0003-0928-5121>

Стаття присвячена актуальній тематичі з визначення впливу місць захоронення твердих побутових відходів на довкілля. В умовах зростання питомого відходоутворення та превалювання захоронення відходів над іншими методами поводження, вплив звалищ і полігонів твердих побутових відходів вимагає ідентифікації. Оцінка рівня техногенного навантаження від місць захоронення побутових відходів ґрунтується на використанні даних по регіонах України і визначенні питомих або похідних показників, яким привласнюється роль індикаторів, оскільки вони дозволяють отримати більш змістовну оцінку. Розроблена система індикаторів техногенного навантаження від місць захоронення твердих побутових відходів включає інтегральні, точкові, часові та специфічні індикатори. Інтегральні індикатори розраховуються відносно території певного регіону: модуль техногенного навантаження, відносна площа та щільність місць захоронення. Точкові індикатори дають інформацію щодо сукупності полігонів: питома захоронення та середня площа одного полігону. До часових індикаторів віднесені інтенсивність накопичення відходів та динаміка зміни середньої площі полігону. До специфічних індикаторів відносяться ті, що описують стихійні звалища – питома захоронення побутових відходів та коефіцієнт впливу несанкціонованих звалищ відносно полігонів побутових відходів. В статті представлені результати розрахунку індикаторів техногенного навантаження від місць захоронення побутових відходів для 24 областей України станом на 2021 р. (довоєнний період). Так, за значенням модулю техногенного навантаження визначені несприятливі регіони – Київська та Донецька області, та регіони з найнижчим рівнем навантаження – Сумська та Кіровоградська області. Найбільш завантаженими виявилися полігони Львівської, Донецької та Хмельницької областей, а найменше – Одеської та Житомирської області, але в цих регіонах вони займають найбільший відсоток площі. Середня інтенсивність накопичення відходів на полігонах твердих побутових відходів склала 4%, а сам показник значно залежить від якості вхідної інформації. Визначено, що вплив несанкціонованих сміттєзвалищ відносно офіційно зареєстрованих місць захоронення є незначним.

Ключові слова: тверді побутові відходи, полігони та сміттєзвалища, техногенне навантаження, індикатор.

Як цитувати: Приходько Вероніка, Сафранов Тамерлан (2025). Оцінка техногенного навантаження від місць захоронення твердих побутових відходів з використанням просторово-часових індикаторів. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (62), 452-461. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-34>

In cites: Prykhodko Veronika, Safranov Tamerlan (2025). Assessment of the technogenic pressure from solid waste disposal sites using spatial and temporal indicators. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (62), 452-461. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-34> [in Ukrainian]

Вступ. Проблема управління та поводження з твердими побутовими відходами (ТПВ) є однією з актуальних екологічних та соціально-економічних проблем сучасного суспільства, перш за все, через зростання обсягів їх утворення та накопичення, а також негативного впливу на природні складові довкілля. Зростають не тільки обсяги ТПВ, але й ускладнюється їхній компонентний склад, особливо за рахунок штучних та небезпечних для довкілля компонентів. Так, якщо на початку ХХ ст. в морфологічному складі ТПВ міст налічувалося до 10 компонентів, цілком дружніх до природи, то на початок ХХІ ст. їх кількість перевищила 70 завдяки широкому колу відходів пластикових матеріалів (ВПМ), хімічних розчинів, композитних матеріалів тощо. Все це значно ускладнює створення ефективних систем управління та поводження з ТПВ, а досягнення рівня нульових

відходів стає все більш проблематичним.

На сьогодні у світі основним методом поводження з відходами є їх захоронення на полігонах і звалищах. Так, за даними Global Waste Management Outlook 2024 [1], у країнах східної Європи 45% ТПВ захоронюється на полігонах і 25% – на неконтрольованих звалищах. В середньому, в світі захоронюють 68% ТПВ. Хоча в «Національній стратегії управління відходами в Україні до 2030 року» [2] вказано, що «надмірна залежність від захоронення побутових відходів не може бути основою системи управління ними на перспективу», варто зазначити, що захоронення лишатиметься основним методом поводження. Відповідно до даних Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України (Мінінфраструктури) [3], у населених пунктах України за 2023 рік утворилося понад 44 млн м³ побутових

відходів, або більш як 9 млн тон, з яких 89,5% були захоронені на 5,6 тис. звалищах і полігонах загальною площею понад 12 тис. га. На сьогодні загальна маса захоронених на них відходів перевищує 235 млн тон.

Також зазначимо, що в даній статті користуємося терміном «тверді побутові відходи (ТПВ)», хоча чинне законодавство передбачає термін «побутові відходи». Під ТПВ розуміються відходи переважно у твердій формі, що утворюються в процесі життєдіяльності людини в житлових та нежитлових приміщеннях, є залишками матеріалів, предметів, виробів, товарів, продукції, які не можуть надалі використовуватися за своїм призначенням у місцях їх накопичення та не пов'язані з виробничою діяльністю підприємств [4].

Дослідження впливу місць видалення ТПВ є актуальною науково-практичною задачею. Так, в «Національній стратегії управління відходами в Україні до 2030 року» [2] серед завдань вказано про необхідність переходу до мережі регіональних полігонів, які відповідатимуть вимогам Директиви ЄС №1999/31/ЄС від 26.04.1999 «Про захоронення відходів». Для реалізації такого переходу необхідно провести попередній аналіз ситуації в сфері захоронення ТПВ на полігонах.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідженням щодо оцінки впливу полігонів ТПВ на довкілля присвячено чимало наукових публікацій, які стосуються, переважно, таких напрямків: утворення та емісія біогазу, кількісні та якісні характеристики фільтрату, комплексний вплив полігону ТПВ на прилеглі території, міграція політантів з полігонів ТПВ тощо. В окрему групу можна виділити роботи українських вчених, присвячені комплексному впливу місць захоронення відходів – В. Поповича, Н. Попович, М. Мальованого, О. Будака, О. Ілляш, В. Погребенного, В. Петрука, І. Пацевої, В. Вамболь та інших. Використанню комплексних показників впливу полігонів ТПВ присвячені роботи авторів даної статті [5-7]. Системний підхід щодо оцінки впливу полігонів ТПВ на прилеглі території розглядається, наприклад, в роботах [8, 9]. В дослідженнях, присвячених техногенному навантаженню на довкілля, як правило, відходи розглядають як складову модулю техногенного навантаження на природні складові довкілля [10-13]. Але полігони ТПВ – це навмисно перетворені на джерела забруднення природні території, які, по-перше, займають певну територію, а, по-друге, є джерелом забруднення повітряного басейну, поверхневих і підземних вод, ґрунтового покриву та геологічного середовища на прилеглій території. Отже, вплив полігонів ТПВ є більш комплексним, який супроводжується вторинними ефектами у довкіллі, а сам полігон розглядається як джерело

забруднення. В цьому випадку показники рівня техногенного навантаження є складовою частиною комплексної оцінки формування екологічної ситуації на основі, наприклад, *PSR*-моделі (*Pressure – State – Response*) [14, 15]. Комплексна оцінка впливу окремих факторів роботи полігону ТПВ є основою для окремого напрямку наукових досліджень з оцінки екологічних ризиків для довкілля [16-18] та здоров'я населення [19, 20].

Аналіз закордонних досліджень з індикаторів впливу полігонів ТПВ на довкілля показав, що переважна більшість досліджень пов'язана з обґрунтуванням індикаторної ролі певних забруднюючих речовин у ґрунтах або ґрунтових водах, видів рослин тощо. Достатньо близькими до представленого дослідження є, до прикладу, розробка муніципального ГІС-індикатора ризику від відходів (*Municipal Risk Index*), який визначається в залежності від кількісних та якісних характеристик відходів, місць розміщення, відомого або потенційного забруднення навколишнього середовища відходами та населення, яке проживає поблизу місць видалення відходів [21]. Комплексній оцінці на основі індикаторів присвячено дослідження вплив на землекористування, спричинений полігонами ТПВ, за допомогою зваженого екологічного індексу (*WEI*) [22]. Згадані індикатори ґрунтуються на комплексному впливі полігонів ТПВ на довкілля, проте наша увага зосереджена на індикаторній ролі використання земель під захоронення таких відходів. Основу представленого дослідження з розробки індикаторів для оцінки техногенного навантаження від місць захоронення ТПВ склали певні методичні підходи з розробки екоіндикаторів [14, 15] та індикаторів сталості поведінки з побутовими відходами [23].

Метою даної статті є представлення результатів наукових досліджень з розробки набору показників-індикаторів техногенного навантаження від місць захоронення ТПВ та його просторово-часових мінливостей в регіонах України. *Об'єктом дослідження* є місця захоронення ТПВ як джерело техногенного навантаження. *Предмет дослідження* – аналіз просторово-часових мінливостей техногенного навантаження, що створюється місцями захоронення ТПВ в регіонах України, з використанням індикаторів.

Методи дослідження: статистичні методи обробки інформації, кваліметричні методи, узагальнення та інтерпретації інформації.

Результати дослідження. Техногенне навантаження від місць захоронення ТПВ – це сукупний вплив усіх забруднюючих речовин, що забруднюють природні складові довкілля. Джерелом техногенного навантаження є накопичені маси ТПВ – складна суміш гетерогенних компонентів, в основному, біодеградабельної складової (харчових,

садово-паркових відходів, паперу і картону, текстилю тощо) та ресурсоцінної складової (пластику, металу, скла тощо) [4].

Розробка індикаторів техногенного навантаження від місць захоронення ТПВ.

Показники, які описують просторові параметри місць захоронення відходів відносно територіальних одиниць певного рівня господарської організації, можна розглядати як такі, що характеризують техногенне навантаження полігонів ТПВ на регіональному рівні. Такі показники мають властивості індикаторів, тобто параметрів або характеристик, на підставі яких можна судити про стан або зміну певного явища або процесу вищого рівня [5, 14, 15, 23]. Розробка набору індикаторів вимагає універсальності та спільності вихідної інформації. Тому вихідними даними для розробки набору індикаторів ситуації із захороненням ТПВ в регіонах мають стати масиви однорідної статис-

тичної інформації, наприклад, дані Мінінфраструктури або Державної служби статистики. Для вивчення техногенного навантаження від місць захоронення ТПВ слід розробити систему індикаторів на основі питомих або похідних показників, які дозволять отримати більш змістовну характеристику ситуації та провести міжрегіональні порівняння. Отже, на основі результатів попередніх досліджень [5-7], сформували систему індикаторів техногенного навантаження від полігонів ТПВ, обравши серед показників використання земель під захоронення ТПВ ті, що максимально наближені до категорії «техногенне навантаження» (табл. 1).

Інтегральні індикатори характеризують місце захоронення ТПВ як джерело техногенного навантаження відносно території регіону, точкові індикатори – описують сукупність місць захоронення ТПВ у межах певної території (регіону).

Таблиця 1/ Table 1

Індикатори техногенного навантаження / Technogenic pressure indicators

Інтегральні	Точкові	Часові	Специфічні
1. Модуль техногенного навантаження від місць захоронення ТПВ. 2. Відносна площа полігонів. 3. Щільність місць захоронення ТПВ.	1. Питоме захоронення на полігонах ТПВ – (м^3 , т на 1 га території полігону). 2. Середня площа одного полігону.	1. Інтенсивність накопичення відходів в місцях захоронення ТПВ, в т.ч. відносно національного рівня. 2. Динаміка зміни середньої площі одного полігону.	1. Питоме захоронення ТПВ на несанкціонованих звалищах. 2. Коефіцієнт впливу несанкціонованих звалищ відносно полігонів ТПВ.

Нижче наводиться стисла характеристика цих індикаторів.

Інтегральні індикатори. *Модуль техногенного навантаження* визначається як сума мас усіх газоподібних, рідких та твердих відходів від промислових та комунальних джерел, а також сільського господарства, віднесених до одиниці площі адміністративного району за рік [21]. Стосовно відходів, в роботах [10, 13] пропонується розглядати модуль техногенного навантаження на геологічне середовище як масу відходів, утворених та накопичених у межах певного регіону.

Модуль техногенного навантаження від місць захоронення ТПВ – загальна маса захоронених відходів станом на певний рік на 1 км^2 площі, що відповідає загальноприйнятому визначенню модуля техногенного навантаження [6].

Відносна площа полігонів – це відсоток площі регіону, зайнятий полігонами.

Близьким до модулю техногенного навантаження є питомий *обсяг накопичених відходів* на 1 км^2 площі регіону, але в таблицю індикаторів (табл. 1) він не включений.

Щільність місць захоронення – це кількість полігонів на 1 км^2 площі регіону.

Отже, загальним для групи інтегральних індикаторів техногенного навантаження від місць захоронення ТПВ є відношення похідних показників до площі регіону.

Точкові індикатори. *Питоме захоронення на полігонах ТПВ* – кількість ТПВ (м^3 , т), що захоронених на 1 га території сміттєзвалищ та полігонів.

Показник *середньої площі одного полігону* не дозволяє зробити однозначний висновок щодо ступеню впливу на довкілля [5], проте є похідним для визначення динаміки зміни середньої площі одного полігону.

Часові індикатори. *Інтенсивність накопичення відходів* – щорічний приріст маси захоронених відходів, у %, який також можна розглянути відносно національного рівня.

Динаміка зміни середньої площі одного полігону розраховується за 5-ти або 10-ти річний період. В авторській роботі [5] вказується про відсутність однозначного зв'язку між високими значеннями індикатору та впливом на довкілля. Проте територіальні одиниці з найбільшою середньою площею одного полігону повинні розглядатися як пріоритетні з точки зору використання біогазового потенціалу регіону.

До категорії специфічних індикаторів можна віднести ситуацію з несанкціонованими сміттєзвалищами. Несанкціоновані сміттєзвалища мають певну специфіку впливу на довкілля і, зазвичай, розглядаються окремими дослідженнями, наприклад [22-24].

Питоме захоронення ТПВ на несанкціонованих звалищах – обсяг ТПВ на одиницю площі несанкціонованого сміттєзвалища (тис. м³/га).

Коефіцієнт впливу несанкціонованих звалищ відносно полігонів ТПВ

$$K = \frac{V_n \cdot S_n}{V_n \cdot S_n} \cdot 100, \quad (1)$$

де V_n та S_n – обсяги відходів та площа несанкціонованих звалищ;

V_n та S_n – обсяги відходів та площа полігонів ТПВ.

Дослідження регіональних особливостей техногенного навантаження від місць захоронення ТПВ.

Результати розрахунку індикаторів техногенного навантаження від місць захоронення ТПВ (станом на 2021 рік) представлені у табл. 2-5. У якості вихідної інформації використані дані щодо місць захоронення ТПВ [3] в розрізі 24 областей України.

Таблиця 2 / Table 2

Інтегральні індикатори техногенного навантаження від місць захоронення ТПВ

по регіонах України (станом на 2021 рік) /

Integral indicators of technogenic pressure from solid waste disposal sites in the regions of Ukraine (2021)

Значення показників	Модуль техногенного навантаження, т/км ²	Відносна площа полігонів, %	Щільність місць захоронення, шт./км ²
Максимальне	1613,42 (Київська область)	0,0314 (Одеська область)	3,30 (Чернівецька область)
Мінімальне	31,56 (Сумська область)	0,0044 (Луганська область)	0,09 (Луганська область)
Національний рівень	451,78	0,0158	0,011

Модуль техногенного навантаження за 2021 р. є достатньо варіабельним (75%) з найбільшим значенням 1613,421 т/км² (Київська область), що у 3,6 рази вище за середнє значення для України. Найменше значення показника характерне для Сумської області – 31,564 т/км², що у 14 разів менше за середнє по Україні. Частка площі регіону, зайнята місцями захоронення ТПВ, в середньому склала 0,0158%, але максимальні значення, характерні для Одеської та Чернівецької областей (з максимальною щільністю місць захоронення), нівелюють перспективи вирішення проблеми відходів за рахунок збільшення площі місць захоронення відходів. Дослідження залежності між показниками відносної площі полігонів та щільності місць захоронення показало наявність тісного лінійного зв'язку з коефіцієнтом кореляції 0,75. Також зазначимо, що перехід від абсолютних значень до відносних величин у вигляді індикаторів дозволяє підвищити однорідність вибірки даних.

На рис. 1 представлений розподіл модулю техногенного навантаження від місць захоронення ТПВ по регіонах України.

З рис. 1 видно, що значення модулю техногенного навантаження для 24 областей України достатньо неоднорідні (коефіцієнт варіації складає 75%).

З табл. 3 видно, що питоме захоронення ТПВ

достатньо варіабельне не тільки по регіонах, а й відповідно до маси/об'єму відходів. Коефіцієнт варіації питомого захоронення ТПВ за об'ємом склав 2,29, за масою – 1,01, що свідчить про значну неоднорідність вибірок даних. Середня площа одного полігону в Україні склала 1,48 га. Максимальне значення характерне для Черкаської області – 9,00 га, мінімальне – 0,21 га для Волинської області.

Виходячи із значень інтенсивності накопичення відходів (табл. 4), можна узагальнити, що, в середньому, 4% від загальної маси ТПВ припадає на 2021 рік. Максимальне значення на рівні 24% (Сумська область) свідчить про недоліки у вихідних даних. За п'ятирічний період середня площа одного полігону зменшилася на 0,02 га, проте кожний регіон України має власну особливість зміни показника.

Значення питомого захоронення на несанкціонованих звалищах та на полігонах ТПВ – 4,12 та 171 тис. м³/га відповідно – свідчить, що стихійні звалища є порівняно незначними за обсягами накопичених відходів. Проте є винятки, наприклад, Харківська область (табл. 5). В середньому по Україні відносна площа несанкціонованих сміттєзвалищ склала 6,85% від загальної площі офіційних полігонів та звалищ, проте кількість виявлених стихійних сміттєзвалищ у 4,5 вища за існуючі місця захоронення ТПВ. За даними щорічних зві-

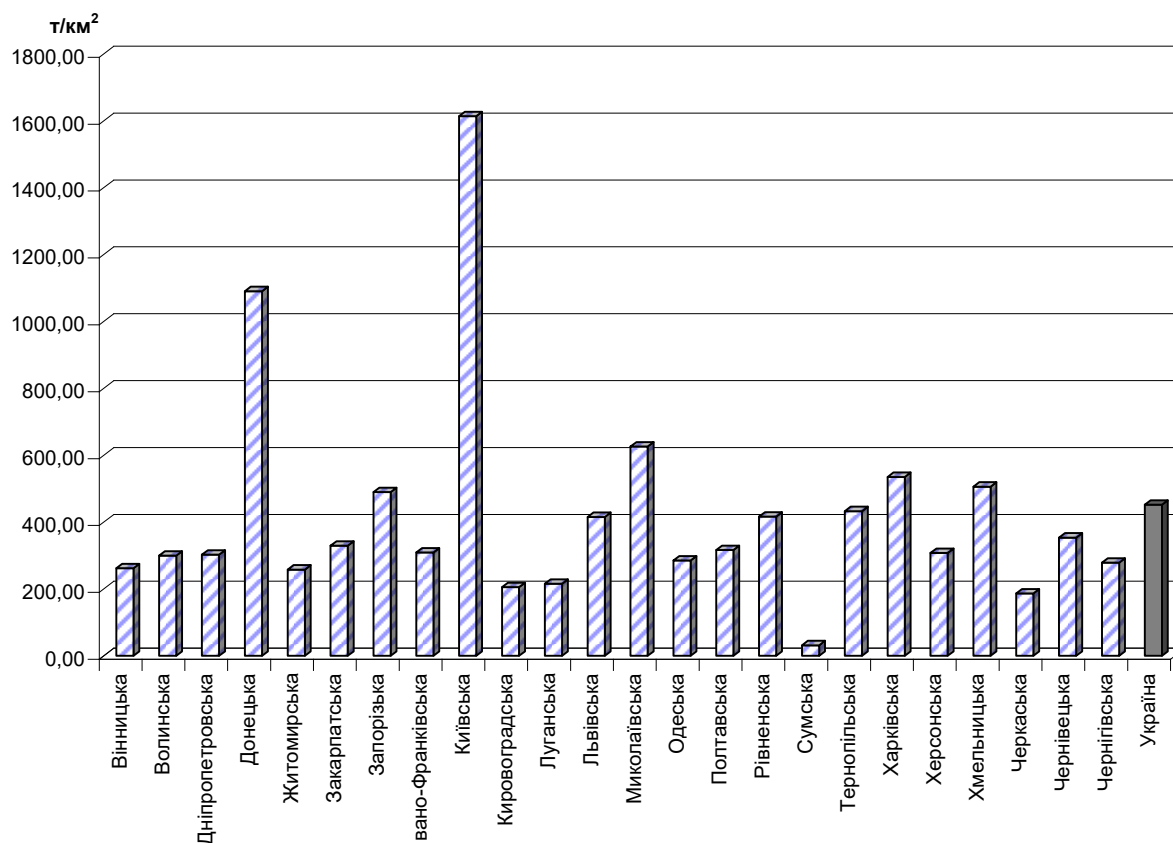


Рис. 1. Модуль техногенного навантаження від місць захоронення ТПВ (станом на 2021 рік)

Fig. 1. Module of technogenic pressure from solid waste disposal sites (2021)

Таблиця 3 / Table 3

Точкові індикатори техногенного навантаження від місць захоронення ТПВ

по регіонах України (станом на 2021 рік) /

Point indicators of technogenic pressure from solid waste disposal sites in the regions of Ukraine (2021)

Значення показників	Питоме захоронення на полігонах ТПВ, тис. м³/га полігону	Питоме захоронення на полігонах ТПВ, тис. т/га полігону	Середня площа полігону, га
Максимальне	3554,36 (Львівська область)	167,87 (Київська область)	9,00 (Черкаська область)
Мінімальне	36,31 (Одеська область)	5,12 (Сумська область)	0,21 (Волинська область)
Національний рівень	171,92	28,68	1,48

Таблиця 4 / Table 4

Часові індикатори техногенного навантаження від місць захоронення ТПВ

по регіонах України (станом на 2021 рік) /

Temporal indicators of technogenic pressure from solid waste disposal sites in the regions of Ukraine (2021)

Значення показників	Інтенсивність накопичення відходів в місцях захоронення ТПВ, %	Динаміка зміни середньої площі одного полігону (2017-2021 pp.), га
Максимальне	24,43 (Сумська область)	2,75 (Черкаська область)
Мінімальне	0,67 (Київська область)	-1,14 (Луганська область)
Національний рівень	4,12	-0,02

Специфічні індикатори техногенного навантаження від місць захоронення ТПВ
по регіонах України (станом на 2021 рік) /
Specific indicators of technogenic pressure from solid waste disposal sites in the regions of Ukraine (2021)

Значення показників	Питоме захоронення ТПВ на несанкціонованих звалищах, тис. м ³ /га	Коефіцієнт впливу несанкціонованих звалищ відносно полігонів ТПВ
Максимальне	93,76 (Харківська область) *	1,078 (Донецька область)
Мінімальне	0,43 (Рівненська область)	$0,77 \cdot 10^{-4}$ (Херсонська область)
Національний рівень	4,12	0,175

* Миколаївська область – 9184,21 тис. м³/га

тів, до прикладу [3], 95% з них ліквідуються протягом року. Коефіцієнт впливу несанкціонованих звалищ відносно полігонів ТПВ є перспективним з точки зору розробки кількісно-якісної класифікації ситуації з незаконного захоронення відходів. Проте отримані значення для Донецької області (більші за 1) свідчать про необхідність перевірки вихідних даних.

Представимо територіальний розподіл окремих індикаторів у вигляді карти-схеми (рис. 2) – модуль техногенного навантаження, питоме захоронення на полігонах ТПВ та інтенсивність накопичення відходів у місцях захоронення ТПВ.

За розрахованими значеннями модулю техногенного навантаження до несприятливих регіонів можна віднести Київську та Донецьку області, де значення індикатору у більше ніж 2 рази вище за середній рівень. Натомість Сумська та Кіровоградська області характеризуються найнижчими показниками модулю техногенного навантаження, що у 2 та більше разів нижчі за національний рівень.

Найбільш завантажені відходами полігони Львівської, Донецької та Хмельницької областей. Натомість Одеська та Житомирська області характеризуються найнижчими показниками питомого захоронення ТПВ, але при цьому полігони займають найбільшу площу серед інших регіонів України.

Інтенсивно поповнювалися полігони Сумської та Дніпропетровської областей, але такі показники можуть свідчити про певні недоліки у вихідних даних. Так, для Сумської області характерна інтенсивність накопичення відходів 24% (протягом 2021 року), проте значення модулю техногенного навантаження є найнижчим з усіх 24 областей України. Середня інтенсивність накопичення відходів на полігонах ТПВ у 2021 р. склала 4%. Це означає, що за умов сталих темпів накопичення відходів вік українських полігонів складає, в середньому, 25 років.

Що стосується специфічних індикаторів, які описують ситуацію з несанкціонованими сміттє-

звалищами (див. табл. 5), то за розрахованими значеннями можна узагальнити, що їх вплив відносно офіційних місць захоронення відходів є незначним.

Дискусія і висновки. 1. Зростання кількості утворених відходів та домінування захоронення відходів у довгостроковій перспективі означає, що території, зайняті полігонами, будуть збільшуватися, тому важливим є дослідження їх впливу на довкілля, зокрема, через кількісні характеристики місць захоронення на регіональному рівні. Показано, що кількість та площа місць захоронення ТПВ, а також маса та об'єм відходів є вихідними даними для розробки системи індикаторів для оцінки техногенного навантаження.

2. Індикаторами є похідні показники, які дозволяють охарактеризувати ситуацію із захороненням відходів на національному рівні та визначити відмінності у розрізі адміністративних областей. Так, станом на 2021 р. на території України захоронено, в середньому, 451,8 т/км² ТПВ, що у 4 рази менше за максимальне техногенне навантаження у Київській області, та у 14 разів більше за мінімальне навантаження у Сумській області.

3. В середньому, полігони ТПВ займають 0,016% площі території, а їх кількість складає 1,1 на 10 км², середня площа – 1,5 га, яка протягом п'ятирічного періоду майже не змінилася. Станом на 2021 р., на 1 га захоронено 172 тис. м³ або 28,7 тис. т ТПВ. За останній рік полігони поповнилися відходами на 4%.

4. Показано, що несанкціоновані сміттєзвалища є незначними як за площею (7% від площі офіційних місць захоронення), так і за обсягом (4,12 проти 171 тис. м³/га для офіційних місць захоронення).

5. Застосування розробленої системи індикаторів техногенного навантаження дозволило провести просторово-часову диференціацію регіонів за рівнем техногенного навантаження від місць захоронення відходів у довоєнний період (2021 р.). Серед регіонів з несприятливою ситуацією із захороненням ТПВ – Київська, Львівська,

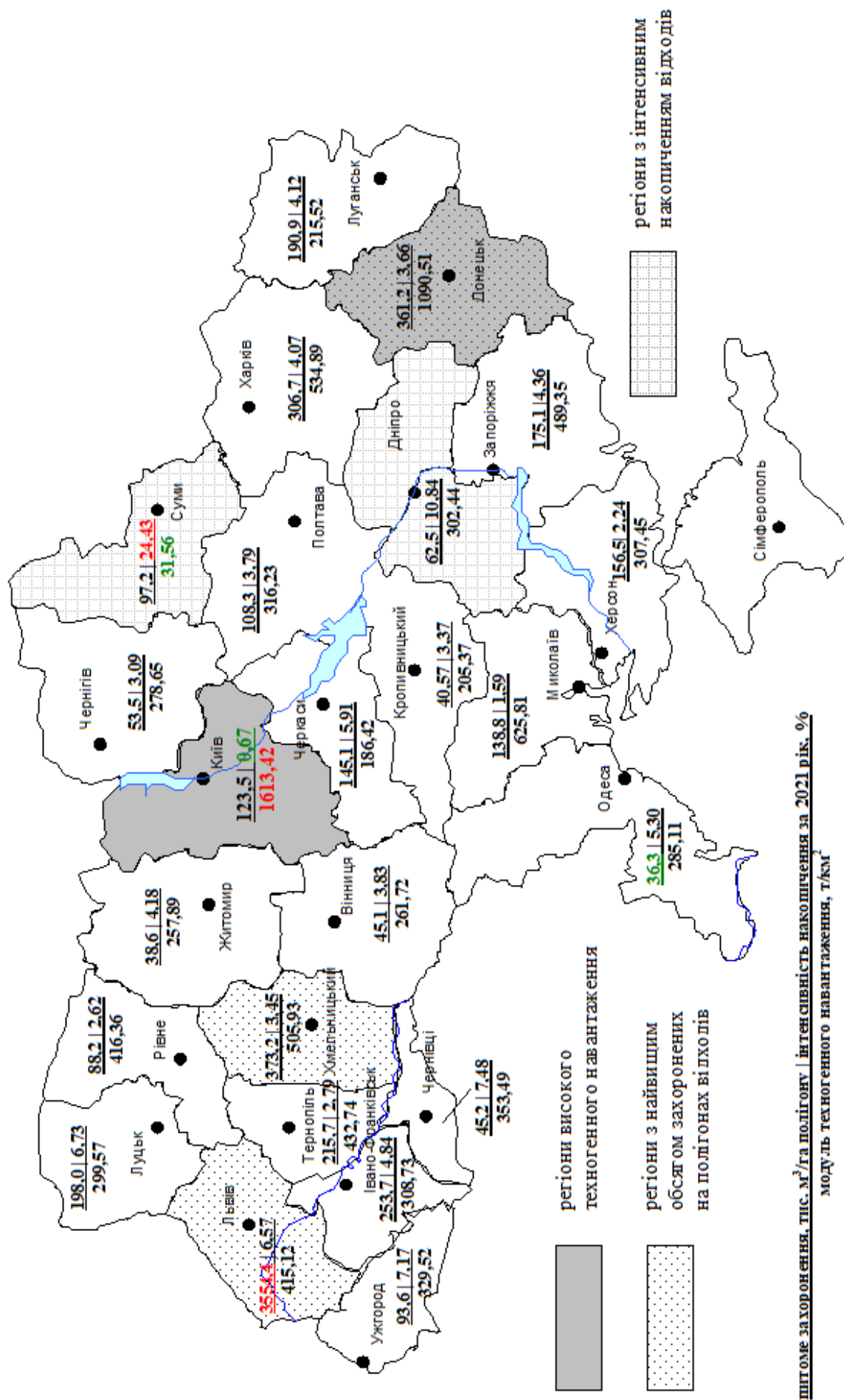


Рис. 2. Індикатори захоронення ТПВ в регіонах України, станом на 2021 р. / Fig. 2. Indicators of MSW disposal by regions of Ukraine (2021)

Донецька та Хмельницька області. Найбільш сприятлива ситуація в Сумській та Вінницькій областях.

6. Перспективи подальших досліджень полягають у розробці комплексних показників впливу місць захоронення та опрацюванні шкал для показників-індикаторів.

Список використаних джерел

1. Global Waste Management Outlook. (2024). URL: https://www.unep.org/resources/global-waste-management-outlook-2024?utm_source=iswa&utm_medium=website&utm_campaign=GWMO2024 (дата звернення 7.11.2024)
2. Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року. (2017). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80#Text> (дата звернення: 25.09.2023).
3. Звіт про стан сфери управління побутовими відходами в Україні за 2023 рік. (2024). URL: <https://mtu.gov.ua/content/upravlinnya-pobutovimi-vidhodami.html> (дата звернення 7.11.2024).
4. Приходько, В.Ю., Сафранов, Т.А. (2024). Ресурсоінна складова твердих побутових відходів окремих регіонів України: монографія. Одеса : ОДЕКУ.
5. Приходько, В.Ю. (2016). Особливості застосування методу зважених балів для районування території за використанням земель для видалення твердих побутових відходів (на прикладі Одеської області). Фізична географія та геоморфологія, 3(83), 71-76.
6. Приходько, В.Ю. (2019). Дослідження регіональних особливостей захоронення твердих побутових відходів в Україні. Вісник ХНУ. Серія «Екологія», 21, 51-62. URL: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2019-21-04>
7. Сафранов, Т.А., Черкез, Є.А., Шаталін, С.М. (2018). Оцінка сприятливості території Одеської області для розміщення полігонів твердих побутових відходів. Український гідрометеорологічний журнал, 21, 98-109.
8. Будак, О.О. (2018). Екологічний моніторинг полігонів твердих побутових відходів та їхній вплив на сільські території: дис... канд. с.-г. наук : 03.00.16. Київ.
9. Пацева, І.Г., Герасимчук, О.Л., Казукіна, А.М. (2022). Системний підхід управління відходами об'єднаних територіальних громад. Екологічні науки, 43, 181-184. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.4-43.30>
10. Чугай, А.В., Сафранов, Т.А. (2020). Техногенне навантаження на складові довкілля при утворенні і накопиченні відходів у регіонах Північно-Західного Причорномор'я. Екологічна безпека та природокористування, 33(1), 5–17. URL: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.1.5-17>.
11. Бастригіна, Т.М., Губіна, В.Г. (2017). Утворення відходів на території України та оцінка техногенного навантаження на природні ландшафти. Хімічна та радіаційна безпека : мат. конф. 24-26 травня 2017, 50-53.
12. Чугай, А.В., Сафранов, Т.А. (2021). Методи оцінки техногенного впливу на довкілля : навч. посібник. Одеса: Букаєв В.В.
13. Chugai, A. V., Safranov, T. A., Mudrak, O. V., Mudrak, H. V. (2020). Assessment of technogenic load on the environment in the regions of the Ukrainian Northwest Black Sea. Ukrainian Journal of Ecology, 10(1), 325-332.
14. Environment monographs № 83: OECD core set of indicators for environmental performance reviews. (1993). Paris: OECD.
15. Environment at a Glance Indicators. (2024). OECD Publishing, Paris. URL: <https://doi.org/10.1787/ac4b8b89-en>.
16. Корбут, М.Б., Сафранов, Т.А., Мальований, М.С. (2024). Методичні підходи до оцінки екологічних ризиків від полігонів твердих побутових відходів. Вісник Хмельницького національного університету, 3 (2), 187-196. URL: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-337-3-28>
17. Єремєєв, І.С., Марчук, С.В. (2015). Невизначеність та ризики під час поводження з твердими побутовими відходами. Ефективна економіка, 7. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=4182> (дата звернення: 07.11.2024);
18. Середа. М.С. (2021). Діагностика ризиків та загроз впливу техногенно порушених земель під звалищами твердих побутових відходів на сільськогосподарські угіддя. Вісник Полтавської державної аграрної академії, 3, 91-100. URL: <https://doi.org/10.31210/visnyk2021.03.11>
19. Ілляш, О.Е., Смоляр, Н.О. (2022). Оцінювання ризиків впливу на довкілля та здоров'я населення при плануванні й реалізації Регіонального плану управління відходами. Проблеми охорони праці в Україні, 38(3-4), 41–46. <https://doi.org/10.36804/nndipbop.39-1-2.2023.47-54>
20. Рибалова, О., Артем'єв, С., Бригада, О., Ільїнський, О., & Мацак, А. (2024). Оцінка ризику для здоров'я населення від забруднення ґрунтів на території полігонів твердих побутових відходів. Вісник ХНУ: серія «Геологія. Географія. Екологія», 60, 399-413. URL: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-30>
21. Адаменко, О.М., Рудько, Г.І. (1998). Екологічна геологія. Київ: Манускрипт.
22. Nataliya Popovych and others. (2018). Environmental Hazard of Uncontrolled Accumulation of Industrial and Municipal Solid Waste of Different Origin in Ukraine. Environmental problems, 1, 53-59. URL: <https://sci.ldubgd.edu.ua/jspui/handle/123456789/9548>
23. Vambol, S., Vambol, V., Sundararajan, M., Ansari, I. (2019). The nature and detection of unauthorized waste dump sites using remote sensing. Ecological Questions. 30(3), 43–55. URL: <https://doi.org/10.12775/EQ.2019.018>
24. Prykhodko, V., Osinovska, V. (2019). The municipal solid waste disposal on illegal dumps in Ukraine. The scientific heritage, 42 (2), 45-48.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Assessment of the technogenic pressure from solid waste disposal sites using spatial and temporal indicators

Veronika Prykhodko ¹

PhD (Geography), Associate Professor of Ecology and Environmental Protection Department,

¹ Odesa I.I. Mechnikov National University, Odesa, Ukraine;

Tamerlan Safranov ¹

DSc (Geology and Mineralogy), Professor of Ecology and Environmental Protection Department

ABSTRACT

Introduction. The article is devoted to the topical issue of determining the environmental impact of solid waste disposal sites. In the context of waste generation growing and the prevalence of waste disposal over other methods of management, the impact of landfills and dumps requires identification. The **purpose** of this article is to present scientific research on the development a set of indicators of technogenic pressure from waste disposal sites and its spatial and temporal variations in the regions of Ukraine. The **object** of the study is solid waste landfills as a source of technogenic pressure. The **subject** of the study is the analysis of spatial and temporal variations of the technogenic pressure created by landfills in the regions of Ukraine using indicators. The study is based on the **methods** of statistical analysis, qualitative metrics, generalisation and interpretation of information.

Results of the study. The assessment of the technogenic pressure level from solid waste disposal sites is based on the use of data for the regions of Ukraine and the identification of specific or derivative indicators, which are assigned the role of indicators, as they allow to obtain a more meaningful assessment. The developed system of technogenic pressure indicators from solid waste disposal sites includes integral, point, time and specific indicators. Integral indicators are calculated in relation to the territory of a particular region: the module of technogenic pressure, the relative area and density of landfills. Point indicators provide information on a set of landfills: specific landfilling and average area of one landfill. Time indicators include the intensity of waste accumulation and the dynamics of changes in the average landfill area. Specific indicators include those describing illegal dumps, such as the specific volume of dumping waste and the coefficient of the illegal dumps impact in relation to the landfills. The article also presents the results of calculating the indicators of technogenic pressure from municipal solid waste disposal sites for 24 regions of Ukraine as of 2021 (pre-war period). Thus, according to the value of the technogenic pressure module, unfavourable regions were identified. The average intensity of waste accumulation at landfills was 4%, and this indicator significantly depends on the quality of the initial information. It has been determined that the impact of illegal dumps in relation to officially registered disposal sites (landfills) is insignificant. The **practical significance** of the work lies in the possibility of applying the developed set of indicators for a particular region or a group of regions. In addition, the application of the developed set of indicators allows us to analyze the dynamics of the process, which is important for assessing the impact of the war on the technogenic pressure redistribution by the regions of Ukraine.

Conclusions. The number and area of landfills, as well as the weight and volume of waste, are the initial data for developing a system of indicators for assessing the technogenic load, the average value of which was 451.8 t/km² of solid waste. On average, landfills occupy 0.016% of the territory, and their number is 1.1 per 10 km². Over the past year, landfills have been replenished with waste by 4%. Regions with unfavourable situations with municipal solid waste disposal include Kyiv, Lviv, Donetsk and Khmelnytskyi regions. The most favourable situation is in Sumy and Vinnytsia regions.

Keywords: municipal solid waste, landfills and dumpsites, technogenic pressure, indicator.

References

1. Global Waste Management Outlook. (2024). Retrieved from: https://www.unep.org/resources/global-waste-management-outlook-2024?utm_source=iswa&utm_medium=website&utm_campaign=GWMO2024 (date of application 15.10.2024).
2. National waste management strategy in Ukraine until 2030. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80#Text> (date of application 15.10.2024) [in Ukrainian]
3. Report on the state of household waste management in Ukraine for 2023. Retrieved from: <https://mtu.gov.ua/content/upravlinnya-pobutovimi-vidhodami.html> (date of application 15.10.2024) [in Ukrainian]
4. Prykhodko, V.Y., & Safranov, T.A. (2024). Resource-value component of municipal solid waste in certain regions of Ukraine: monograph. Odesa: ODEKU, 101. [In Ukrainian]
5. Prykhodko, V. Yu. (2016). Features of applying the method of weighted scores for zoning by land use for municipal solid waste removal (on the example of Odessa region). *Physical geography and geomorphology*, 3(83), 71-76. [in Ukrainian]
6. Prykhodko, V. Yu. (2019) Regional features research of municipal solid waste disposal in Ukraine. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University*, 21, 51-62 <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2019-21-04>. [in Ukrainian]
7. Safranov, T. A., Cherkez, Ye. A., & Shatalin, S. M. (2018). Evaluation of the extent of favourableness of the territory of the Odesa region for placement of solid household waste landfills. *Ukrainian hydrometeorological journal*, 21, 98-109. [in Ukrainian]

8. Budak O.O. (2018). *Ecological monitoring of solid household waste landfills and their impact on rural areas: PhD thesis*. Kyiv, 152 [in Ukrainian]
9. Patseva, I., Herasymchuk, O., & Kahukina, A. (2022). Systematic approach to waste management of united territorial communities. *Environmental Sciences*, 43, 181-184 <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.4-43.30>. [in Ukrainian]
10. Chugai, A. V., & Safranov, T. A. (2020). A Technogenic load on the environmental components during the formation and accumulation of the waste in the North-Western Black Sea regions. *Environmental safety and natural resources*, 33(1), 5–17. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.1.5-17>
11. Bastrygina, T.M., & Gubina, V.G. (2017). Waste generation in Ukraine and assessment of the technogenic load on natural landscapes. *Chemical and radiation safety: materials of the conference*, 24-26 May 2017, 50-53. [in Ukrainian]
12. Chugai, A.V., & Safranov, T.A (2021). *Methods of assessing the technogenic impact on the environment: a textbook*. Odesa, Bukaev V.V., 118. [in Ukrainian].
13. Chugai, A. V., Safranov, T. A., Mudrak, O. V., & Mudrak, H. V. (2020). Assessment of technogenic load on the environment in the regions of the Ukrainian Northwest Black Sea. *Ukrainian Journal of Ecology*, 10(1), 325-332.
14. *Environment monographs № 83: OECD core set of indicators for environmental performance reviews*. (1998). Paris: OECD, 38.
15. OECD (2024), *Environment at a Glance Indicators*, OECD Publishing, Paris, URL: <https://doi.org/10.1787/ac4b8b89-en> (date of application 15.10.2024)
16. Korbut, M., Safranov, T., Malovanyy, M. (2024). Methodological approaches to the assessment of environmental risks from solid domestic waste landfills. *Herald of Khmelnytskyi national university*, 3(337), 87-196. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-337-3-28>. [in Ukrainian]
17. Eremeev, I.S., & Marchuk, S.V. (2015). *Uncertainty and Risks in Solid Waste Management. Effective Economy*. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=4182> (date of application 15.10.2024) [in Ukrainian]
18. Sereda, M.S. (2021). Diagnostics of risks and threats of technogenically disturbed lands under solid household waste dumps on agricultural land. *Bulletin of Poltava State Agrarian Academy*, №3, 91-100. <https://doi.org/10.31210/visnyk2021.03.11> [in Ukrainian]
19. Illiash, O., & Smoliar, N. (2022). Risk assessment of impact on the environment and public health when planning and implementing the regional waste management plan. *Labour Protection Problems in Ukraine*, 38(3-4), 41–46. DOI: 10.36804/nndipbop.38-3-4.2022.41-46. <https://doi.org/10.36804/nndipbop.39-1-2.2023.47-54> [in Ukrainian]
20. Olha Rybalova and others (2024). Assessment of the risk to public health from soil contamination on the territory of solid waste landfills. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series «Geology. Geography. Ecology»*, 60, 399-413. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-30>. [in Ukrainian]
21. Adamenko, O., & Rudko, G. (1998) *Environmental geology*. Kyiv, 348 p. [in Ukrainian]
22. Nataliya Popovych, Myroslav Malyovanyy, Oksana Telak, Andriy Voloshchyshyn, & Vasyl Popovych. (2018). Environmental Hazard of Uncontrolled Accumulation of Industrial and Municipal Solid Waste of Different Origin in Ukraine. *Environmental problems*, 1, 53-59. Retrieved from: <https://sci.ldubgd.edu.ua/jspui/handle/123456789/9548>
23. Vambol, S., Vambol, V., Sundararajan, M., & Ansari, I. (2019). The nature and detection of unauthorized waste dump sites using remote sensing. *Ecological Questions*, 30(3), 43–55. <https://doi.org/10.12775/EQ.2019.018>
24. Prykhodko, V., & Osinovska, V. (2019). The municipal solid waste disposal on illegal dumps in Ukraine. *The scientific heritage*, 42. Vol. 2, 45-48.

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 27 November 2024

Accepted 17 March 2025

Розрахунок балансу біогенних елементів у ґрунтах агроєкосистеми р. Рось

Ольга Ухань¹

к. геогр. н., зав. лабораторії регіональних гідрохімічних досліджень відділу гідрохімії,

¹ Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України, Київ, Україна,

e-mail: ukhan_o@ukr.net,  <https://orcid.org/0000-0002-4856-7175>;

Світлана Білецька¹

наук. співробітник,

e-mail: biletska@ukr.net,  <https://orcid.org/0000-0002-0190-4162>;

Наталія Осадча¹

д. геогр. н., зав. відділу гідрохімії,

e-mail: nosad@uhmi.org.ua,  <https://orcid.org/0000-0001-6215-3246>;

Юлія Лузовицька¹

к. геогр. н., ст. наук. співробітник,

e-mail: luzovitska@ukr.net,  <https://orcid.org/0000-0002-2052-0156>;

Статтю присвячено визначенню балансу біогенних елементів у ґрунтах агроєкосистеми басейну р. Рось. Для розрахунків балансу використовували первинні дані статистичних управлінь Київської, Черкаської, Вінницької та Житомирської областей у розрізі адміністративних районів. Баланс нітрогену та фосфору у ґрунтах визначали як різницю між сумарним надходженням вказаних сполук (органічної та неорганічної форми) та їхнє вилучення з урожаєм сільськогосподарських культур. Надходження сполук нітрогену та фосфору мінеральної форми відбувається переважно за рахунок розвитку рослинництва. У басейні р. Рось до 85% від загальної площі рілля зайнято трьома домінуючими культурами: зерновими (50%), технічними (28%) та зернобобовими (22%). Найбільше надходження неорганічного нітрогену та фосфору зафіксовано у Вінницькій області. В цілому, у 2020 році спостерігалось зростання їх вмісту в ґрунтах у межах областей досліджуваного річкового басейну в середньому на 30% за рахунок збільшення обсягів використання мінеральних добрив. Зазначено, що у басейні р. Рось серед багатьох напрямків тваринництва саме птахівництво є основним джерелом навантаження органічними сполуками нітрогену та фосфору. В розрізі областей найбільше надходження сполук органічного нітрогену та фосфору спостерігалось для Київської та Черкаської областей через розташування в їх межах найбільших в Україні агрохолдингів – «Ясенсвіт» та «Наша Ряба». Проте величина надходження сполук органічного нітрогену та фосфору зменшилася у 2020 році на 35-40% внаслідок зменшення кількості поголів'я сільськогосподарських тварин і свійської птиці в агрохолдингах. Встановлено, що протягом досліджуваного періоду середньозважена величина балансу загального нітрогену характеризувалася надлишковим значенням внаслідок застосування технологій інтенсивного рослинництва. Зазначено, що основне навантаження відбувається за рахунок як мінеральної, так і органічної форми нітрогену. Баланс фосфору, натомість, відзначався дефіцитним станом за рахунок активного споживання рослинами та додатковою сорбцією ґрунтовими породами. Навантаження фосфором формується переважно за рахунок розвитку птахівництва. На відміну від нітрогену, основне навантаження формується за рахунок органічної форми фосфору.

Ключові слова: баланс фосфору, баланс нітрогену, навантаження біогенними елементами, рослинництво, тваринництво.

Як цитувати: Ухань Ольга, Білецька Світлана, Осадча Наталія, Лузовицька Юлія (2025). Розрахунок балансу біогенних елементів у ґрунтах агроєкосистеми р. Рось. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія», (62), 462-472. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-35>

In cites: Ukhan Olha, Byletska Svitlana, Osadcha Nataliia, Yuliia Luzovitska (2025). Calculation of nutrients balance in the soils of the Ros River agroecosystem. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, (62), 462-472. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-35> [in Ukrainian]

Вступ. Сільське господарство є базовим елементом агропромислового комплексу України. На його основі формується продовольча, економічна та екологічна безпека. Активний розвиток сільського господарства сприяє покращенню роботи технологічно пов'язаних галузей. У галузі землеробства України за організаційною структурою домінують сільськогосподарські підприємства та фермерські господарства - 69%. Майже удвічі менше оброблюваних земель припадає на господарства населення. Натомість, виробництва тваринницької галузі більшою мірою зосереджені у господарствах населення - 64% [1-2].

Загальна кількість добрив, що застосовуються до сільськогосподарських земель протягом року, безумовно, є важливим чинником при оцінці впливу сільського господарства на навколишнє середовище. З точки зору вірогідності впливу на якість води важливішим показником є валовий баланс поживних елементів, що утворився протягом року у верхньому шарі ґрунту. Він розраховується як різниця між кількістю поживних речовин, які входять у сільськогосподарську систему, і виходять з неї. Надлишок поживних елементів у ґрунті створює потенційних ризик їхнього вимивання під час формування водного стоку та надход-

ження у водні об'єкти, що може призвести до евтрофікації водойм [3, 4, 5]. Особливості застосування мінеральних добрив у значній мірі залежать від водного режиму та типології ґрунтів, кількості атмосферних опадів.

Високий рівень сільськогосподарського використання земель призводить до порушення екологічно збалансованого співвідношення між сільськогосподарськими угіддями, лісами та водоймами, що негативно впливає на стійкість агроландшафтів і зумовлює значне антропогенне навантаження на довкілля в цілому. Тривала нераціональна експлуатація земельних ресурсів, інтенсивна обробка ґрунтів, високий відсоток посівів просапних культур призводять до посилення деградаційних процесів у ґрунтах внаслідок інтенсивної ерозії [6, 7, 8].

Річка Рось - одна з найбільших приток в басейні р. Дніпро. Довжина річки 378,3 км, площа басейну - 12749 км². Басейн р. Рось розташований на правобережній Придніпровській височині на території двадцяти двох адміністративних районів чотирьох областей: Київської (49% від загальної площі басейну), Черкаської (20% території водозбору), Вінницької та Житомирської (16% та 15% відповідно). Річка Рось є однією з найбільш зарегульованих річок України [9, 10].

Географічне положення басейну р. Рось зумовлює її особливу роль у екомережі, як об'єднуючої ланки між окремими регіонами - зоною мішаних лісів та лісостепом України. Серед річкових басейнів Дніпра, територія водозбору р. Рось вирізняється високим рівнем освоєності та антропогенного навантаження, одним із провідних компонентів якого є інтенсивний розвиток сільського господарства. Зокрема, сільськогосподарські землі охоплюють 73% від загальної території басейну річки, серед яких 80% - посівні площі різних культур [11, 12]. Інтенсифікація сільськогосподарського виробництва на території досліджуваного басейну тісно пов'язана з використанням агрохімічних засобів, які шляхом просочування та вимивання з ґрунтової товщі можуть призводити до забруднення вод сполуками нітрогену та фосфору [13, 14].

Висвітленню проблематики забруднення поверхневих вод біогенними елементами присвячено багато робіт вітчизняних науковців. У різні часи наукові праці В.К. Хільчевського, В.І. Пелешенка, Н.М. Осадчої висвітлювали питання умов формування кругообігу нітрогену та фосфору та їх надходження до поверхневих водних об'єктів. Вивченню особливостей навантаження зазначеними сполуками поверхневих вод присвячено наукові публікації [15, 16, 17].

Особлива увага щодо вивчення надходження біогенних елементів від точкових та дифузних

джерел у сучасний період приділяється за необхідності переходу державної системи моніторингу до європейських стандартів. Важливим результатом теоретичних та практичних досліджень стало розроблення методики розрахунку навантаження поверхневих вод біогенними елементами [18].

У публікаціях науковців [19, 20] стверджується, що сільськогосподарська діяльність є одним з головних чинників надходження сполук нітрогену та фосфору до ґрунтової системи, формування їх балансу та подальше надходження до поверхневих вод. Визначення гумусу в ґрунтах, лужногідролізованого нітрогену та рухомого фосфору детально описувалося вченими Тюрнім, Коновою Бельчиковою, Корнфілдом, Чириковим та іншими. У методиках авторів [5, 10, 17] поширено твердження, що утворення біогенних сполук в ґрунтовому ценозі є позитивним чинником, що підвищує його поживну цінність і родючість.

Забруднення поверхневих вод безпосередньо р. Рось сполуками нітрогену та фосфору від дифузних джерел оглядово було представлено у [1, 11]. Рослинництво та тваринництво як вагомі джерела надходження біогенних елементів дифузного походження детально вивчалися науковцями Українського гідрометеорологічного інституту (УкрГМІ) під час роботи над документом "Розробка проекту плану управління річковим басейном басейну річки Дніпро в Україні: 1 фаза, крок 2 - Аналіз тиску та впливу, оцінка ризику, екологічні цілі для поверхневих водних об'єктів" у рамках програми Європейська спільна водна ініціатива плюс для країн Східного партнерства (EUWI+4), що фінансувалась ЄС.

Результати сучасних досліджень балансу нітрогену та фосфору у агроєкосистемі р. Рось **вперше** представлено саме у даній роботі.

Метою роботи було оцінити вплив сільськогосподарської діяльності на формування балансу біогенних елементів (сполук нітрогену та фосфору) в ґрунтах на території водозбору р. Рось в межах адміністративно-територіальних одиниць - областей та районів. Актуальність роботи полягає у розширенні знань щодо аналізу визначення особливостей та шляхів надходження біогенних елементів (реакційно здатних сполук нітрогену та фосфору) до агроєкосистеми, процесів їх вимивання та подальшого надходження до водних об'єктів. Такі дослідження сприяють розробці заходів щодо попередження виникнення евтрофікації поверхневих вод, спричиненого надходженням нітратних сполук з сільськогосподарських джерел. Проведені дослідження розробляються у природоохоронних цілях, що може сприяти встановленню основних критеріїв при визначенні зон, уразливих до накопичення біогенних елементів

сільськогосподарського походження і подальшому визначенні потенційних ризиків забруднення поверхневих вод.

Методика дослідження. Джерелом інформації для визначення балансу біогенних речовин у ґрунтах (дані про кількість та типи тварин, посівні площі та урожайність культур, застосування мінеральних і органічних добрив) була річна звітність управління статистики чотирьох областей - Київської, Черкаської, Вінницької та Житомирської у розрізі найнижчої доступної просторової одиниці - адміністративного району [21, 22]. Роки дослідження - 2018 та 2020 рр.

Баланс нітрогену та фосфору у ґрунтах визначали як різницю між сумарним надходженням вказаних сполук із добривами та їхнє вилучення з урожаєм сільськогосподарських культур.

Так, *прибуткова частина* балансу розраховувалася за наступним рівнянням:

$$Input(N,P) = Mf(N,P) + Of(N,P) + N_{atm} + N_{ns} + N_{sf} \quad (1),$$

де Input(N,P) - прибуткова частина нітрогену та фосфору, що надійшла у ґрунт, кг/га;

Mf(N,P) - кількість нітрогену та фосфору, що надійшла з мінеральними добривами, кг/га;

Of(N,P) - кількість нітрогену та фосфору, що надійшла з органічними добривами, кг/га;

N_{atm} - надходження сполук нітрогену в ґрунт з атмосферними опадами, кг N/га;

N_{ns} - несимбіотичне надходження нітрогену, кг N/га;

N_{sf} - симбіотична фіксація нітрогену бобовими культурами або багаторічними травами, кг/га.

Під несимбіотичним надходженням сполук нітрогену мали на увазі його потенційну фіксацію вільноживучими мікроорганізмами в ґрунті [2, 20]. Симбіотична фіксація - це надходження атмосферного нітрогену в ґрунт внаслідок симбіозу бульбочкових бактерій із кореневою системою бобових культур чи багаторічних трав. Обсяг такої фіксації залежить від виду рослини та ґрунтово-кліматичних умов [5, 6, 12, 19].

У проведених обчисленнях відкориговано кількісні показники надходження нітрогену за рахунок симбіотичної фіксації с/г культурами - 0,33 кг N/га багаторічні трави і 0,94 кг N/га - бобові [12, 13] та несимбіотичної фіксації різними типами ґрунтів - сірими лісовими - $\geq 31,2$ кг N/га, чорноземами 35 кг N/га [12, 16].

Показники надходження нітрогену з атмосферними опадами застосували на основі їхньої регіоналізації за фізико-географічними зонами та обчислень на підставі даних моніторингу атмосферних опадів за період 2000-2020 рр.. Середня річна кількість опадів для зони мішаних лісів становила 606 мм, лісостепу - 571 мм, а кількість

нітрогену, що надходить з опадами в межах зазначених зон, становила 4,5 кг/га та 5,7 кг/га відповідно до робіт [5, 6, 8, 12].

Для обчислення надходження біогенних елементів з органічними добривами використовували дані про кількість та типи тварин. Коефіцієнти надходження біогенних елементів з гною свійських тварин та посліду свійських птахів запозичено із робіт [13, 19, 20]. Загальне надходження біогенних елементів з органічним добривом розраховували за рівнянням (2):

$$Of(N,P) = C/S_{total} \quad (2),$$

де Of(N,P) – кількість нітрогену та фосфору, що надходить з органічними добривами, кг/га;

C – вміст сполук нітрогену та фосфору в 1 т гною/пташиного посліду, кг;

S_{total} – загальна посівна площа, га.

Витратна частина балансу розраховувалась за наступним рівнянням:

$$Output(N,P) = (N,P)_h + N_{ev} + N_d + N_{ex} + P_{runoff} + P_{cum} \quad (3),$$

де Output(N; P) – витратна кількість нітрогену та фосфору з ґрунту, кг/га;

- $(N, P)_h$ – кількість нітрогену та фосфору, яка вилучається з ґрунту врожаєм сільськогосподарських культур, кг/га;

- N_{ev} - втрати нітрогену внаслідок випаровування NH_3 , кг/га;

- N_d – втрати нітрогену внаслідок денітрифікації, кг/га;

- N_{ex} – втрати нітрогену внаслідок вилуговування NO_3 , кг/га.

- P_{runoff} - транспортування фосфору у складі поверхневого і дифузного стоку, кг/га;

- P_{cum} - кумулятивні втрати сполук фосфору, кг/га.

Споживання рослинам нітрогену та фосфору за рахунок вилучення з ґрунту врожаєм сільськогосподарських культур становить основну кількість витратної частини балансу і визначається за рівнянням:

$$N(P)_y = y * k(N/P) \quad (4),$$

де $N(P)_y$ – кількість нітрогену (фосфору), що вилучається з ґрунту врожаєм основних сільськогосподарських культур, кг/га;

- y - урожайність сільськогосподарської культури, ц/га;

- $k(N/P)$ – коефіцієнт споживання з ґрунту сільськогосподарською культурою, кг/ц.

Коефіцієнти споживання поживних елементів рослинами залежать від цілого ряду чинників: біологічних особливостей культур, умов зволоження, типу ґрунту, ступеня забезпеченості сільськогосподарських культур рухомими формами поживних елементів, кліматичних умов, рівня

врожайності тощо [2, 6, 12]. Для наших розрахунків коефіцієнти споживання нітрогену та фосфору різними культурами запозичено з роботи [12]. Винос їх з ґрунту сільськогосподарськими культурами значною мірою залежить від їхнього вмісту в основній і побічній продукції врожаю. Показники врожайності отримано з офіційних статистичних даних [1-2].

Вихід нітрогену з ґрунту внаслідок процесів випаровування аміаку та процесів денітрифікації було оцінено за допомогою досліджень [15, 19-20]. Втрати нітрогену при потенційній міграції нітратів по ґрунтовому профілю - на основі досліджень [4, 7, 16].

Під кумулятивними втратами мали на увазі зменшення вмісту сполук фосфору внаслідок деградації ґрунтів через водну ерозію. Потенційні втрати фосфору з ґрунту внаслідок водної ерозії використовувались з досвіду у дослідженнях [15, 19], в яких встановлено залежність зростання емісії фосфору з території водозбору зі збільшенням частки оброблюваних сільськогосподарських земель. Внаслідок впливу водної ерозії до 94% фосфору транспортується у складі ерозійних часток і до 6% - у складі дифузного стоку [9, 14, 18, 20].

Дифузне надходження сполук фосфору з мінеральними добривами носить локальний характер, оскільки, такі мінеральні добрива, як суперфосфат, ортофосфат, амофос тощо, застосовують лише у залежності від технологічних вимог вирощування сільськогосподарських культур [11, 12].

Результуюче значення балансу розраховували за наступним рівнянням:

$$B(N;P)=Input(N;P)-Output(N;P)/\Sigma S, \quad (5),$$

де $B(N;P)$ - загальний баланс нітрогену, фосфору в ґрунті, кг/га;

- $Input(N;P)$ - прибуткова складова балансу сполук нітрогену та фосфору, кг/га;
- $Output(N;P)$ - витратна складова балансу сполук нітрогену та фосфору, кг/га;
- ΣS - загальна посівна площа у межах адміністративної одиниці (району), га.

Результати. Нітроген – один із найважливіших елементів живлення для рослин, він входить до складу білків та нуклеїнових кислот, ферментів, молекул хлорофілу. Вміст нітрогену в ґрунті на достатньому рівні забезпечує повноцінний ріст та розвиток рослини, тому є одним із основних показників родючості ґрунтів. Найбільше нітрогену міститься в чорноземах типових лісостепової зони України та у чорноземах звичайних північного степу, найменше – у дерново-слабопідзолистих і середньопідзолистих ґрунтах Полісся [1, 8, 9]. Близько 93-97 % нітрогену входить до складу гумусу, решта - це мінеральні сполуки, за рахунок яких відбувається живлення рослин. Мі-

неральний (неорганічний) нітроген в ґрунті представлений іонами амонію (NH_4^+) та нітрат-іонами (NO_3^-). Співвідношення неорганічного нітрогену до органічного приблизно становить 1/9 [18, 22].

Фосфор зустрічається в ґрунтах як в органічній формі, так і в неорганічній (мінеральній) формі, розчинність якої у ґрунті низька. Наявність фосфору для рослин є важливим чинником для стимуляції росту, підвищення продуктивності та прискорення зрілості. Вміст фосфору в рослинах, ґрунті, добривах прийнято виражати в перерахунку на його оксид P_2O_5 .

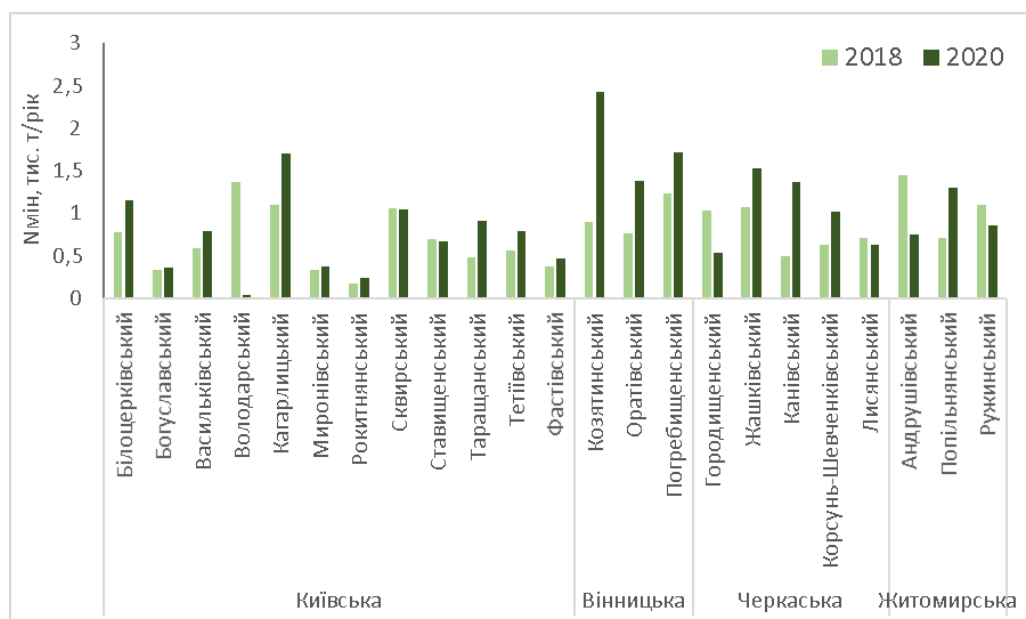
Рослинництво. У земельному фонді басейну р. Рось приблизно 990 тис. га займає рілля [1, 2, 13]. Серед областей у межах яких знаходиться басейн р. Рось, згідно проведеного аналізу, найбільша частка посівів сільськогосподарських культур (площею понад 390 тис. га) знаходилась у Київській обл.

На основі регіоналізації посівних площ басейну р. Рось проаналізовано дані державних статистичних спостережень за формою №29-СГ (річна) щодо площ та зборів сільськогосподарських культур за 2018 р. та 2020 р. [21]. Згідно з опрацьованою інформацією, до 85% від загальної площі ріллі було зайнято трьома домінуючими культурами: зерновими (50%), технічними (28%) та зернобобовими (22%), що підпорядковується сучасним тенденціям їх агрокліматичного зонування.

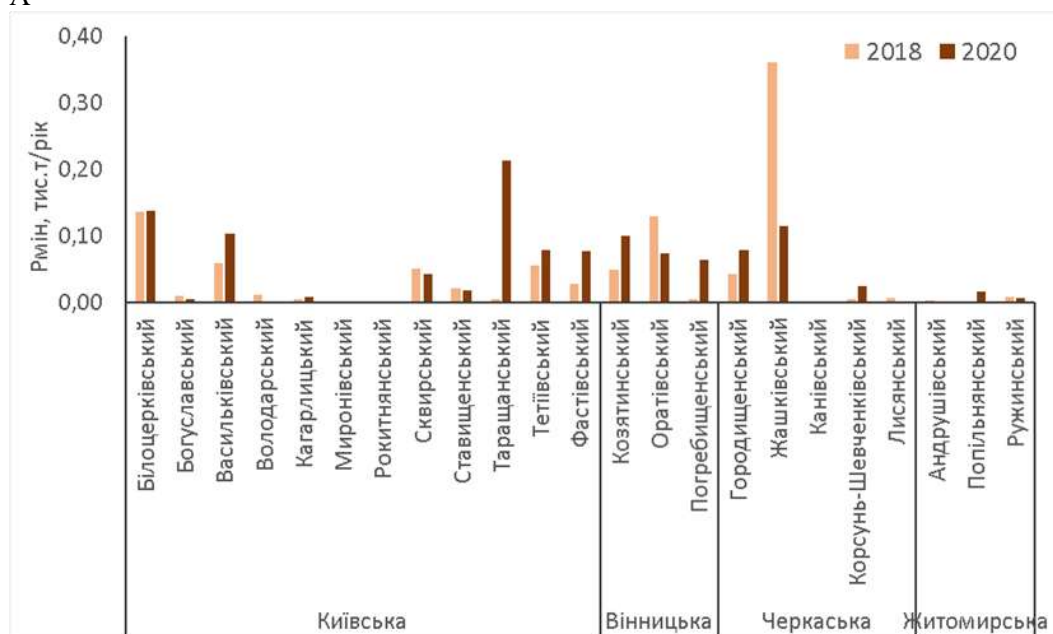
Найбільш поширеним серед різноманіття азотних добрив в межах басейну р. Рось є використання аміачної селітри. Аміачна селітра представляє собою амонійно-нітратне добриво, що містить азот у співвідношенні $NH_4:NO_3$ - 1:1 та містить 34 % нітрогену у складі. Для ґрунтів, насичених основами (чорноземи, сірі) аміачна селітра - одна з найкращих форм азотних добрив, бо не викликає підкислення ґрунтів, навіть при систематичному використанні. Згідно з аналізом статистичних даних середня норма застосування аміачної селітри на території басейну р. Рось у 2018 р. складала до 61 кг/га; у 2020 р. цей показник відчутно зріс і сягав 104 кг/га.

Для розуміння кількості азоту, що надходив до ґрунтової системи проведено перерахунок на чистий нітроген. На основі цих розрахунків встановлено, що до ґрунтової екосистеми водозбору р. Рось протягом 2018 року саме з таким видом мінеральних добрив, як аміачна селітра сумарно надходило до 18 тис. т/рік сполук $N_{\min}$, у 2020 р. - понад 22 тис. т/рік сполук $N_{\min}$. Територіальний розподіл надходження сполук нітрогену неорганічної форми в межах адміністративних районів для кожної з областей представлено на рис. 1А.

Як видно з рис.1А зростання вмісту сполук нітрогену внаслідок застосування мінеральних



А



Б (В)

Рис. 1. Надходження сполук нітрогену (А) та фосфору (Б) в межах адміністративних районів внаслідок застосування мінеральних добрив / Fig. 1. Inputs of nitrogen (A) and phosphorus (B) compounds within administrative districts due to the use of mineral fertilizers

добрив у агроєкосистемі р. Рось у 2020 р. було притаманне фактично кожному району, що найвірогідніше є результатом впровадження технології ведення інтенсивного рослинництва. Найбільше надходження було закономірно приурочене до районів із найбільшими посівними площами під зерновими та технічними сільськогосподарськими культурами - Козятинський р-н Вінницької обл. (з 0,9 до 2,5 тис. т/рік); Канівський район (з 0,5 до 1,4 тис. т/рік) Черкаської обл.

Фосфорні добрива вносили переважно у вигляді суперфосфату, який належить до групи розчинних у воді фосфатних добрив. Саме ця група добрив є найбільш поширеною у використанні.

Суперфосфат містить до 20% фосфору у вигляді оксиду P_2O_5 . Середня доза використання суперфосфату в межах досліджуваного річкового басейну становила 1 кг/га, а максимальна - понад 6 кг/га і спостерігалася у Городищенському р-ні Черкаської обл. та Таращанському р-ні Київської обл.

Територіальний розподіл надходження сполук мінерального фосфору представлено на рис. 1Б. За результатами аналізу, найбільше зростання надходження сполук фосфору з мінеральними добривами у 2020 році спостерігалася для Київської області. За сумарним значенням надходження сполук фосфору на території басейну р. Рось зросло з 0,4 у 2018 р. і до 0,7 тис. т/рік у 2020 р. Серед

представлених районів найбільше надходження зафіксовано у Таращанському районі (з 0,01 до 0,21 тис. т/рік).

Тваринництво. Проведений аналіз статистичних даних згідно статистичного бюлетеня «Виробництво продукції тваринництва» свідчить про те, що птахівництво в Україні є переважаючим серед решти видів діяльності - до 98% поміж інших галузей тваринництва. У басейні р. Рось саме птахівництво є основним джерелом навантаження органічними сполуками нітрогену та фосфору. Так, у 2018 р. його частка досягала 77% (відносно органічних сполук нітрогену) та 54% (відносно сполук фосфору).

Високі показники навантаження біогенними елементами у 2018 р. були притаманні районам, у межах яких розташовано крупні агрохолдинги. Зокрема, на території водозбору р. Рось у Канівському р-ні Черкаської обл. розташована філія підприємства одного з найбільших агрохолдингів Європи (філія Миронівської птахофабрики ТМ «Наша ряба»), що має загальну виробничу потужність комплексу 40500 гол/год. У Васильківському р-ні Київської обл. знаходиться птахокомплекс «Ясенвіт», який входить до п'ятірки найбільших виробників яєць у Європі та має чисельність несучок до 2,3 млн. голів. Можливий потенційний вихід органічних відходів від зазначених підприємств може сягати 15 т/га.

Проведені дослідження свідчать, що у 2018 та 2020 рр. із гною сільськогосподарських тварин і пташиного посліду утворювалось 24 та 19 кг/га органічних сполук нітрогену. За проведеними розрахунками, сумарна величина надходження сполук нітрогену з органічними добривами в межах басейну р. Рось становила 22 тис. т/рік у 2018 р. та 8 тис. т/рік у 2020 р. Територіальний розподіл надходження органічного нітрогену в межах адміністративних районів представлено на рис. 2А.

Як видно з представленого графіку, у 2020 р. суттєво зменшилася величина надходження сполук нітрогену у складі гною та пташиного посліду. Основними причинами зменшення обсягів виробництва продукції тваринництва, найвірогідніше, є скорочення чисельності поголів'я худоби та свійської птиці (тобто зниження валової продукції тваринництва). Максимальні показники надходження органічних сполук нітрогену у 2018 р. спостерігались у Васильківському р-ні Київської обл. (3,1 тис. т/рік) та Канівському р-ні Черкаської обл. (3,9 тис. т/рік), на територіях яких розташовано філії потужних агрохолдингів.

Що стосується надходження сполук фосфору із гноєм тварин та пташиним послідом, то сумарно його кількість в 2020 р. зменшилася для кожної з областей в межах басейну р. Рось (рис. 2Б).

Проведені дослідження свідчать, що у 2018

та 2020 рр. із гною сільськогосподарських тварин і пташиного посліду утворювалось 13,2 та 9,2 кг/га органічних сполук фосфору. Найменші показники зафіксовано у Андрушівському районі (Житомирська обл.) - 0,4-0,7 кг/га, найбільші - у Васильківському районі (Київська обл.) - 62-77 кг/га.

За проведеними розрахунками, сумарна величина надходження сполук фосфору з органічними добривами в межах басейну р. Рось становила 12 тис. т/рік у 2018 р. та 8 тис. т/рік у 2020 р. Максимальні показники - до 3 тис. т/рік спостерігались для Васильківського р-ну (2020 р.) та Канівського р-ну (2018 р.). Мінімальною величиною надходження сполук фосфору характеризувався Андрушівський р-н. - 0,02-0,04 тис. т/рік.

Найбільші зміни у розрізі областей спостерігались для Черкаської області (для Городищенського, Канівського та Жашківського р-нів) - сумарне надходження сполук органічного фосфору зменшилося майже вдвічі - з 5,3 у 2018 р. до 2,3 тис. т/рік у 2020 р. Основною причиною зазначених змін, на нашу думку, є зменшення поголів'я свійської птиці по області майже на 7 %.

Балансові розрахунки. Проведені розрахунки прибуткової частини балансу показали, що сукупне надходження сполук нітрогену в ґрунт дорівнювало 65 кг N/га для обох з досліджуваних років. Серед складових прибуткової частини балансу у 2018 році найбільша частка належала надходженню з органічними добривами - 24 кг N/га або 36% від загального надходження сполук нітрогену. Натомість, у 2020 році першість перейшла до мінеральних добрив - 22 кг N/га (34%). Несимбіотичне надходження сполук нітрогену не перевищувало 28%.

У витратній частині балансу найбільшу роль відігравало споживання нітрогену врожаєм сільськогосподарських культур (72%) та втрати на процеси випаровування аміаку (14%).

На основі узагальнення проведених розрахунків в межах областей встановлено, що на території водозбору р. Рось переважно формується надлишок нітрогену в ґрунті, який у 2018 р. дорівнював 2,2 кг N/га, в 2020 р. - 8 кг N/га (рис. 3А).

Разом з тим, відзначено широку варіабельність величин середньозваженого балансу нітрогену: від дефіциту на рівні -47 кг N/га в Андрушівському р-ні (Житомирська обл.) до надлишку у 63 кг N/га у Канівському р-ні (Черкаська обл.). Досить високі показники надлишку нітрогену пов'язані з місцевостями, де вносились найбільші дози азотних добрив.

Сукупне надходження сполук фосфору до ґрунтової системи дорівнювало 14 кг P/га в 2018 р. та 10 кг P/га в 2020 р. У прибутковій частині балансу надходження сполук фосфору з органіч-

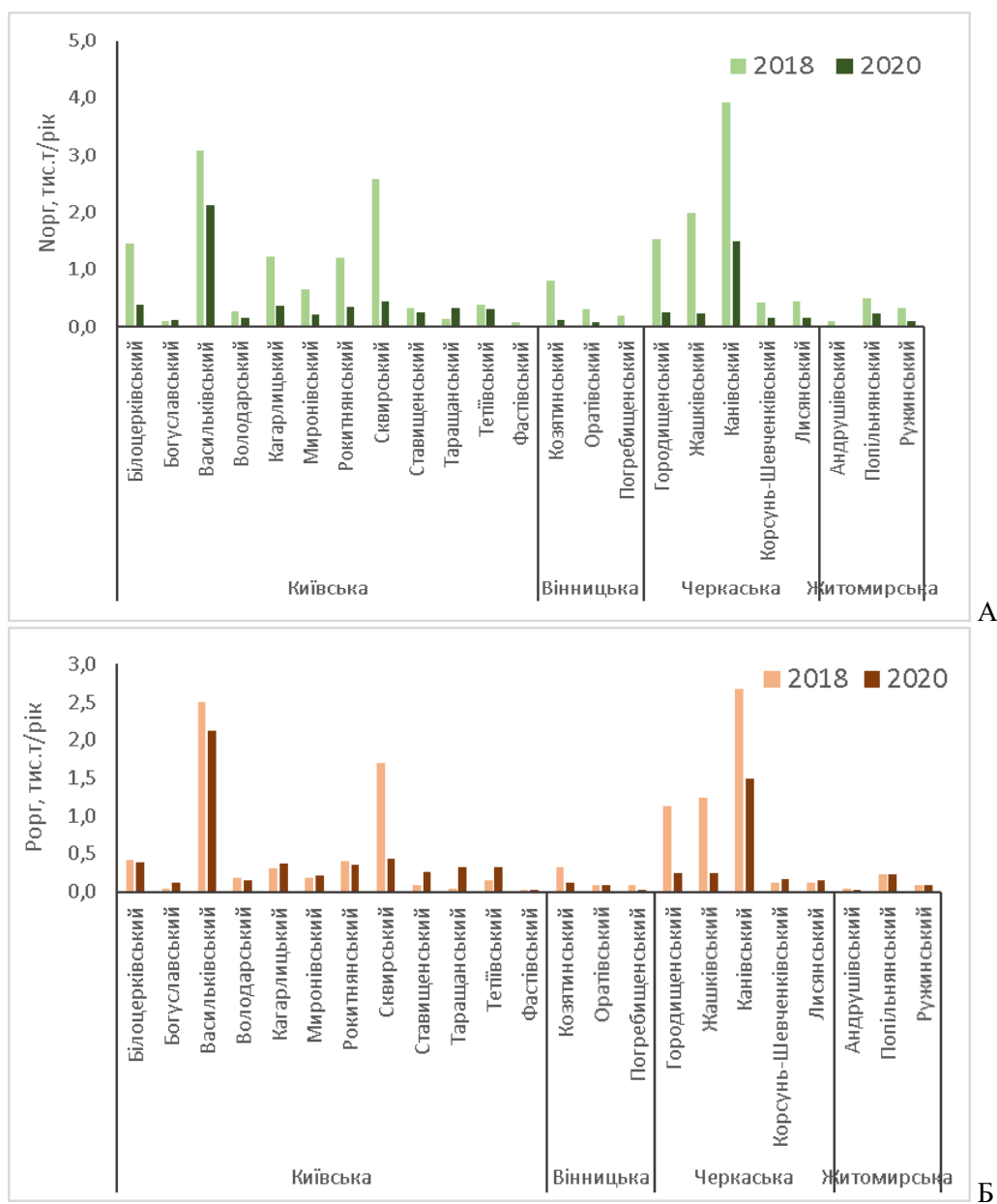


Рис. 2. Надходження сполук нітрогену (А) та фосфору (Б) у складі гною сільськогосподарських тварин та посліду птахів / Fig. 2. Inputs of nitrogen (A) and phosphorus (B) compounds with livestock and poultry manure

ними добривами зменшилося до 9,2 кг Р/га у 2020 р. у порівнянні з 13,2 кг Р/га у 2018 р. але при цьому все одно становило найбільшу частку - 89-94%. Находження сполук фосфору з мінеральними добривами не перевищувало 11%.

Найбільший відсоток у витратній частині балансу сполук фосфору зафіксовано для величини споживання врожаєм сільськогосподарських культур - до 94%. Кумулятивні втрати фосфору та винесення його сполук з поверхневим та дифузним стоком не перевищували 4%.

Відповідно до розрахунків середньозваженого балансу в межах областей на території басейну р. Рось спостерігався дефіцит на рівні -34 кг Р/га у 2018 р. та -22 кг Р/га в 2020 р. (рис. 3Б). У просторовому розподілі величин середньозваженого балансу сполук фосфору в ґрунтах

відзначалося їх коливання від дефіциту на рівні -54 кг Р/га (Корсунь-Шевченківський р-н Черкаської обл.) та -48 кг Р/га (Андрушівський р-н Житомирської обл.) до надлишку у 18 кг Р/га (Канівський р-н Черкаської обл.) та 28 кг Р/га (Васильківський р-н Київської обл.). Найбільші величини надлишку сполук фосфору приурочені до районів з великою кількістю свійських тварин і птиці (із середнім значенням $LSU \geq 60$ тис. од. тварин).

Дискусія і висновки. Внаслідок розрахунків, виконаних на основі статистичної інформації встановлено, що середньозважений баланс сполук нітрогену в ґрунтах басейну р. Рось за період досліджень характеризувався надлишком і в середньому становив 5,3 кг N/га. Баланс фосфору, натомість, характеризувався дефіцитним станом і за осередненим значенням дорівнював -28 кг Р/га.

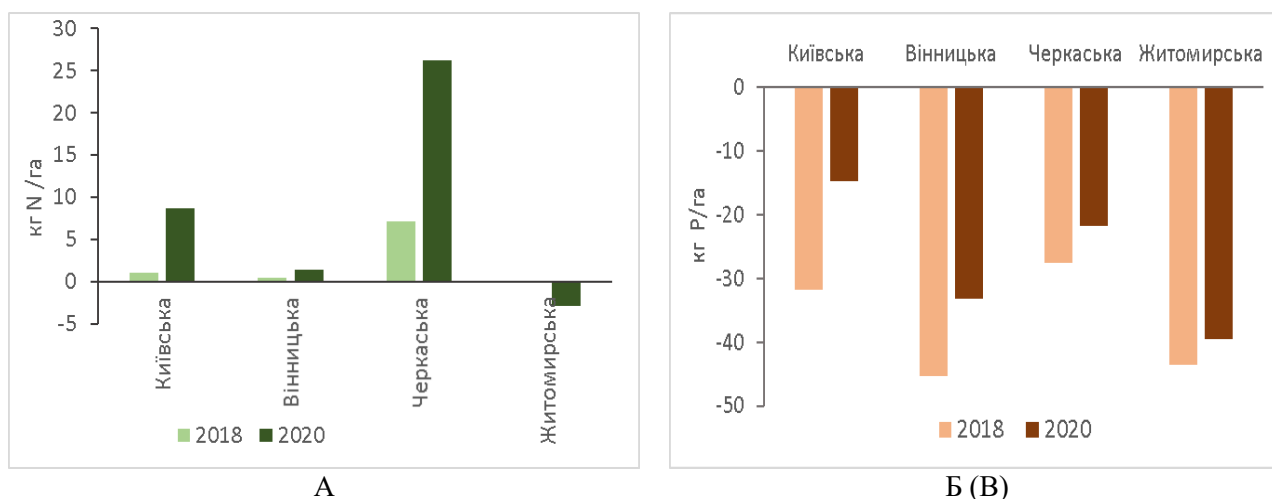


Рис. 3. Середньозважений баланс у ґрунті: А - сполук нітрогену, Б - сполук фосфору /
Fig. 3. Weighted average balance in soils of: А - nitrogen compounds, В - phosphorus compounds

На формування балансу нітрогену та фосфору в агроєкосистемі найбільше впливав обсяг урожаю сільськогосподарських культур.

Навантаження сполуками азоту формувалось за рахунок надходження як з органічними добривами (2018 р), так і з мінеральними (2020 р.). Найбільше утворення нітрогену органічного походження спостерігалось для Васильківського р-ні Київської обл. та Канівському р-ні Черкаської обл. (в середньому до 84 кг/га), на територіях яких розташовано філії потужних агрохолдингів. Максимальна доза внесення азотних добрив (87 кг N/га) у 2018 р. була зафіксована у Погребищенському р-ні Вінницької області. У 2020 р. найбільше азотних добрив (206 кг N/га) вносили у Козятинському р-ні Вінницької обл.

Навантаження сполуками фосфору переважно формувалось за рахунок розвитку птахівництва і становило 92% від загальної частки. Найбільше внесення сполук фосфору органічного по-

ходження - до 80 кг P/га - зафіксовано в Васильківському р-ні Київської обл. та Канівському р-ні Черкаської обл. у 2018 р. через розташування в їх межах найбільших в Україні агрохолдингів - «Ясенвіт» та «Наша Ряба».

Сільське господарство є базовим елементом агропромислового комплексу України. Високий рівень сільськогосподарського використання земель зумовлює значне антропогенне навантаження на довкілля. Зважаючи на це, для більш об'єктивного визначення зон, уразливих до накопичення біогенних елементів сільськогосподарського походження, відбір інформації та розрахунок балансу біогенних елементів у агроєкосистемі має відбуватись за кожний рік або не рідше, ніж як через рік. Враховуючи те, що їхні результати у значній мірі залежать від структури і потужності тваринницької галузі, врожайності сільськогосподарських культур та від норми застосування мінеральних добрив.

Список використаних джерел

1. Пелешенко В. І., Закревський Д. В., Хільчевський В. К. (1985). Вплив господарської діяльності на гідрохімічний режим і якість води р. Рось. Вісник Київ. ун-ту, Географія, 27, 37-44.
2. Господаренко Г.М. (2015). Агрохімія: підручник. К.: ТОВ «СІК ГРУП Україна».
3. Ухань О.О., Осадча Н.М. (2021). Оцінка антропогенного навантаження біогенними елементами та органічними речовинами у басейні р. Тетерів Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія, 1(59), 58-63. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.1.6>
4. Štefan Koco, Jozef Vilček, Stanislav Torma (2020). Nitrogen and phosphorus transport as a criterion for soil categorization, Soil Sci. Ann, 71(2), 174-181. <https://doi.org/10.37501/soilsa/123322>.
5. Gross Nitrogen Balances (2007). Handbook. OECD and EUROSTAT.
6. Яцук І.П. (2017). Наукові дослідження з моніторингу та обстеження сільськогосподарських угідь України: за результатами X туру (2011-2015 pp.). К.: Б.В.
7. J. Feng et al. (2021). Global patterns and associated drivers of priming effect in response to nutrient addition. Soil Biology and Biochemistry, 153:108118. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.108118>.
8. Anderson and Downing, Jordan et al. (2006). Science of the Total Environment. 434 (2012), 101-109.
9. Білецька С.В., Осадча Н.М. (2014). Вплив фізико-географічних умов басейну р. Рось на надходження гумусових речовин у поверхневі води. Геополітика і екогеодинаміка регіонів, 371-377.
10. Білецька С.В., Осадча Н.М. (2012). Аналіз ґрунтового покриття басейну р. Рось та оцінка впливу на надходження гумусових речовин у річкову мережу. Наукові праці УкрНДГМІ, 262, 84-96.

11. Хільчевський В.К. (1996). Роль агрохімічних засобів у формуванні якості вод басейну Дніпра. К.: ВПЦ «Київський університет».
12. Балюк С. А., Греков В. О., Лісовий М. В., Комариста А. В. (2011). Розрахунок балансу гумусу і поживних речовин у землеробстві України на різних рівнях управління. Харків: КП "МД".
13. Корецька С.О. (2012). Економічний механізм розвитку агропромислової інтеграції. *Агросвіт*, 7, 15-24.
14. Білецька С.В., Осадча Н.М., Бончковський А.С. (2021). Методика розрахунку балансу біогенних елементів ґрунту. Матеріали конференції "Другого Всеукраїнського гідрометеорологічного з'їзду", 37-38.
15. Piwowar, A., Dzik, M. (2021). Water management in Poland in terms of reducing the emissions from agricultural sources-current status and challenges. *Cleaner Engineering and Technology*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100082>
16. Bojanowski D., Orlińska Woźniak P., Wilk P., Szalińska E. (2022). Estimation of nutrient loads with the use of mass balance and modelling approaches on the Welnia River catchment example (central Poland). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17270-4>.
17. Gaj, R., Budka, A., Antonkiewicz, J., Bak, K., Izychar, P. (2018). Effect of long-term slurry application on contents of available forms of soil macronutrients. *Soil Science Annual*, 2018, 69(3), 194-204, <https://doi.org/10.2478/ssa-2018-0020>.
18. Осадча Н.М., Лузовіцька Ю.А., Ухань О.О., Білецька С.В., Осипов В.В., Бончковський А.С., Набиванець Ю.Б., Осадчий В.І. (2022). Методика оцінки навантаження поверхневих водних об'єктів біогенними елементами. *Український географічний журнал*, 4 (120), 37-48, <https://doi.org/10.15407/ugz2022.04>
19. Szara, E., Sosulski, T., Szymanska, M. (2019). Impact of long-term liming on sandy soil phosphorus sorption properties. *Soil Science Annual*, 70(1), 13-20, <https://doi.org/10.2478/ssa-2019-0002>.
20. McDowell, R. W., Simpson, Z. P., Ausseil, A. G., Etheridge, Z. & Law, R. I. (2021). The implications of lag times between nitrate leaching losses and riverine loads for water quality policy. *Sci. Rep.* 11, 1-14, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95302-1>.
21. Державна служба статистики. Рослинництво України. Статистичний збірник, 2018, 2020 pp.
22. Державна служба статистики. Тваринництво України. Статистичний збірник, 2018, 2020 pp.
23. Директива Ради 91/676/ЄС (від 12 грудня 1991 р.). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/987_002-91#Text

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Calculation of nutrients balance in the soils of the Ros River agroecosystem

Olha Ukhan¹

PhD (Geography), Head of the Regional Hydrochemical Researches Laboratory
Hydrochemistry Department, ¹ Ukrainian Hydrometeorological Institute
of the State Emergency Service of Ukraine and
the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine;

Svitlana Byletska¹

Researcher;

Nataliia Osadcha¹

DSc (Geography), Head of the Hydrochemistry Department;

Luzovitska Yuliia¹

PhD (Geography), Senior Researcher

ABSTRACT

Introduction. The Ukrainian agricultural sector is dominated by farms and enterprises (69%), livestock productions are concentrated in households - 64%. The total amount of fertilizer applied to agricultural land over the year is an important factor in assessing the environmental impact of agriculture. Excessive nutrients in the soil pose a potential risk of leaching during the formation of water runoff and subsequent flow into the water body, which can lead to eutrophication of water bodies. Agricultural land in the Ros River catchment area covers 73% of the total territory of the river basin, of which 80% is sown with various crops.

Aim of the research is to assess the impact of agricultural activities on the formation of the nutrients (nitrogen and phosphorus compounds) balance in soils in the Ros River watershed within the administrative units such as regions (4 in total) and districts (23 in total).

Scientific novelty. The results of modern research on the balance of nitrogen and phosphorus in the Ros River agroecosystem are presented for the first time in this paper.

Practical value. The study is carried out for environmental purposes to establish basic criteria for identifying vulnerable areas to agricultural nutrient accumulation and to further identify potential risks of surface water pollution and develop measures to prevent water eutrophication.

Methods. The balance of nitrogen and phosphorus in soils was defined as the difference between the total supply them with fertilizers and their removal with crop yields. The income and expense sides of the balance sheet were calculated using special formulas. Calculations were made on the basis of statistical data on the number and types of animals, sown areas and crop yields, and the use of mineral and organic fertilizers for the periods of 2018 and 2020. Within the Ros River basin, data from the annual reports of the four oblasts statistical departments (Kyivska, Cherkaska, Vinnytska, and Zhytomyrska) by administrative districts were used.

Results and conclusions. The calculations based on statistical information revealed that the weighted average nitrogen balance in the soils of the Ros River basin during the study period was in excess and averaged 13 kg N/ha; the phosphorus balance, on the other hand, was characterized by a deficit state and was equal to -28 kg P/ha. The load of nitrogen compounds was formed due to the supply of both organic fertilizers (2018) and mineral fertilizers (2020). The largest formation of nitrogen of organic origin was observed in Vasylykiv district of Kyiv region and Kaniv district of Cherkasy region (up to 84 kg/ha on average), where branches of powerful agricultural holdings are located. The highest dose of nitrogen fertilizers (87 kg N/ha) in 2018 was recorded in Pohrebyshe district of Vinnytsia region. In 2020, the largest amount of nitrogen fertilizers (206 kg N/ha) was applied in Koziatyn district of Vinnytsia region. The load of phosphorus compounds was mainly formed due to the development of poultry farming and amounted to 92% of the total share. The highest intake of phosphorus compounds of organic origin (over 80 kg P/ha) was in Vasylykiv district of Kyivska region and Kanivskyi district of Cherkaska region due to the location of the largest agricultural holdings in Ukraine – “Yasensvit” and “Nasha Ryaba”.

Keywords: phosphorus balance, nitrogen balance, nutrient load, crop production, livestock production.

References

1. Peleshenko V. I., Zakrevskiy D. V., Khilchevskiy V. K. (1985). Influence of economic activity on the hydrochemical regime and water quality of the Ros River. *Bulletin of Kyiv University, Geography*, 27, 37-44. [In Ukrainian]
2. Hospodarenko H.M. (2015). *Agrochemistry: a textbook*. Kyiv, 376. [in Ukrainian]
3. Ukhan O.O., Osadcha N.M. (2021). Assessment of anthropogenic load of biogenic elements and organic substances in the Teteriv River basin. *Hydrology, hydrochemistry and hydroecology*, 1(59), 58-63. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.1.6>. [in Ukrainian]
4. Štefan Koco, Jozef Vilček, Stanislav Torma (2020). Nitrogen and phosphorus transport as a criterion for soil categorization. *Soil Sci. Ann*, 71(2), 174-181. <https://doi.org/10.37501/soilsa/123322>.
5. Gross Nitrogen Balances. *Handbook*. OECD and EUROSTAT. 2007.
6. Yatsuk I.P. (2017). *Scientific studies on the monitoring and survey of agricultural lands of Ukraine: based on the results of the X round (2011-2015)*. K.: B.V. [in Ukrainian]
7. J. Feng et al. (2021). Global patterns and associated drivers of priming effect in response to nutrient addition. *Soil Biology and Biochemistry*, 153:108118, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.108118>
8. Anderson and Downing Jordan (2012). *Science of the Total Environment*. 434, 101–109.
9. Biletska S.V., Osadcha N.M. (2014). The influence of physiographic conditions of the Ros River basin on the flow of humic substances into surface waters. *Geopolitics and ecogeodynamics of regions*, 371-377. [in Ukrainian].
10. Biletska S.V., Osadcha N.M. (2012). Analysis of the soil cover of the basin of the Ros River and evaluation of the influence on the flow of humic substances into the river network. *Science works of UHMI*. Kyiv, 262, 84-96. [in Ukrainian]
11. Khilchevskiy V.K. (1996). *The role of agrochemicals in the formation of water quality in the Dnipro basin*. Kyiv: The Kyiv University Center. [In Ukrainian]
12. Baliuk S. A., Hrekov V. O., Lisovyi M. V., Komarysta A. V. (2011). Calculation of the balance of humus and nutrients in the agriculture of Ukraine at different levels of management. *Kharkiv*, 30. [in Ukrainian]
13. Koretska S.O. (2012). Economic mechanism for the development of agro-industrial integration. *Ahrosvit*, 7, 15-24. [In Ukrainian]
14. Biletska S.V., Osadcha N.M., Bonchkovskiy A.S. (2021). Methodology for calculating the balance of biogenic soil elements. *Materials of the conference “Second All-Ukrainian Hydrometeorological Congress”*, 37-38. [in Ukrainian].
15. Piwowski, A., Dzikuc, M. (2021). Water management in Poland in terms of reducing the emissions from agricultural sources-current status and challenges. *Cleaner Engineering and Technology*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100082>
16. Bojanowski D., Orlińska Woźniak P., Wilk P., Szalińska E. (2022). Estimation of nutrient loads with the use of mass balance and modelling approaches on the Welna River catchment example (central Poland). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17270-4>.
17. Gaj, R., Budka, A., Antonkiewicz, J, Bak, K., Izychar, P. (2018). Effect of long-term slurry application on contents of available forms of soil macronutrients. *Soil Science Annual*, 2018, 69(3), 194-204, <https://doi.org/10.2478/ssa-2018-0020>.
18. Osadcha N.M., Luzovitska Y.A., Ukhan O.O., Biletska S.V., Osipov V.V., Bonchkovskiy A.S., Nabyvanets Y.B., Osadchyi V.I. (2022) Methodology for assessing the load of surface water bodies with nutrients. *Ukrainian Geographical Journal*, 4 (120), 37-48. <https://doi.org/10.15407/ugz2022.04> [in Ukrainian].

19. Szara, E., Sosulski, T., Szymanska, M. (2019). Impact of long-term liming on sandy soil phosphorus sorption properties. *Soil Science Annual*, 70(1), 13-20, <https://doi.org/10.2478/ssa-2019-0002>.
20. McDowell, R. W., Simpson, Z. P., Ausseil, A. G., Etheridge, Z. & Law, R. (2021). The implications of lag times between nitrate leaching losses and riverine loads for water quality policy. *Sci. Rep.* 11, 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95302-1>
21. State Statistics Service. *Vegetation of Ukraine. Statistical collection.* 2018, 2020. [in Ukrainian].
22. State Statistics Service. *Animal husbandry of Ukraine. Statistical collection.* 2018, 2020. [in Ukrainian].
23. Council Directive 91/676/EEC of December 12, 1991 on the protection of water against pollution from agricultural sources caused by nitrates. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/987_002-91#Text

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 26 December 2024

Accepted 21 May 2025

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 geosco-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 23 April 2023

Accepted 12 May 2023

Integrating remote sensing and aeromagnetic data for lithological and structural lineaments mapping in Abu Ghaylan - Kiklah - Tighrinna, northwest Libya

Nureddin Saadi¹

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 Elkoul²

...

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 Сааді¹

доктор філософії (геологічна інженерія), викладач кафедри геологічної інженерії,

¹ Університет Тріполі, Тріполі, Лівія;

Усама Елкул²

...

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, лінеamenti, 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

Надійшла 23 квітня 2023 р.

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Прийнята 12 травня 2023 р.

Наукове видання

ВІСНИК
ХАРКІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
імені В. Н. КАРАЗІНА

серія
«ГЕОЛОГІЯ. ГЕОГРАФІЯ. ЕКОЛОГІЯ»

Випуск 62

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 26.05.2025 р. Формат 60x84/8. Папір офсетний.
Друк цифровий. Ум. друк. арк. 44,3. Обл.-вид. арк. 51,3.
Наклад 100 пр. Зам. № 11/25. 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.