ISSN 1992-4259 (Print)
ISSN 2415-7651 (Online)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

ВІСНИК
ХАРКІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
імені В. Н. КАРАЗІНА
СЕРІЯ «ЕКОЛОГІЯ»

Випуск 34

VISNYK
of V. N. KARAZIN KHARKIV NATIONAL UNIVERSITY
SERIES ECOLOGY
Issue 34

Харків
2026

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

Фахове видання (категорія Б) з **географічних** (**спеціальності 101, 103**)
та **біологічних** наук (**спеціальності 091, 101**) .
Наказ МОН України від 17.03.2020 № 409

Засновано у 2005 році
Періодичність виходу – 2 рази на рік

УДК 502/504+911+57

У віснику висвітлюються сучасні досягнення у галузях екології, біології, географії та природокористування. Особлива увага приділяється дослідженням, спрямованим на розв'язання актуальних екологічних проблем, впровадження інноваційних підходів у сфері охорони довкілля, а також узагальненню та поширенню міжнародного досвіду екологічного менеджменту та сталого розвитку.Надаються результати наукових досліджень у таких напрямах, як екологія людини, медико-екологічні дослідження, біотехнологія, конструктивна географія, екологія та збалансоване природокористування. Значна увага приділяється питанням екологічного моніторингу, оцінки стану навколишнього середовища, застосування сучасних природоохоронних технологій, а також проблемам організації та методології екологічної, біологічної, географічної і природоохоронної освіти.

Для науковців і фахівців-екологів, біологів, географів, а також викладачів, аспірантів, магістрів і студентів вищих навчальних закладів України та інших країн без будь-яких обмежень

Затверджено до друку рішенням Вченої ради Харківського національного університету
імені В.Н. Каразіна (протокол № 9 від 25.05.2026 р.)

Головний редактор:
Крайнюков О. М., д-р геогр. наук, проф., Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Україна;
Заступник головного редактора:
Цапко Н. С., канд. техн. наук, доц., НДУ «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», Україна.

Редакційна колегія:

Бєдункова О. О., д-р біол. наук, проф., Національний університет водного господарства та природокористування, Україна;
Давиденко К. В., канд. наук, Шведський університет сільськогосподарських наук, Уппсала, Швеція;
Максименко Н. В., д-р геогр. наук, проф., Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Україна;
Мироничева О. С., канд. с.-г. наук, PhD з технічних наук, Університет технологій Люлео, Швеція;
Некос А. Н., д-р геогр. наук, проф., Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Україна;
Прищепа А. М., д-р с-г наук, проф., Національний університет водного господарства та природокористування, Україна;
Цапко Ю. Л., д-р біол. наук,, с.н.с., ННЦ «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О. Н. Соколовського НААН», Україна;
Чаплигіна А. Б., д-р біол.наук, проф.,Харківський національний педагогічний університет імені Г. С. Сковороди, Україна;.
Шабанов Д. А., д-р біол. наук, проф., Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Україна;
Шкарубо А., д-р філософії, Естонський університет наук про життя, Тарту, Естонія.

Адреса редакційної колегії: 61022, Харків, майдан Свободи, 6, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, навчально-науковий інститут екології, кімн. 473а
тел. (057)707-53-86, 705-09-66, 707-56-36,
e-mail: visnykecology@karazin.ua **Web-pages**: http://periodicals.karazin.ua/ecology (OJS)

Статті пройшли подвійне «сліпе» рецензування. Автори опублікованих матеріалів несуть повну відповідальність за підбір, точність наведених фактів, власних імен тощо.

Ідентифікатор медіа у Реєстрі суб'єктів у сфері медіа: R30-04448
(Рішення № 1538 від 09.05.2024 р Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення.
Протокол № 15)

© Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, оформлення, 2026

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

Journal is a Professional publication (category B) on **geographical** (specialties 101, 103)
and **biological sciences** (specialties 091, 101)
Registration at the DAC of Ukraine: Order of the Ministry of Education and Culture of Ukraine
dated March 17, 2020 No. 409
Established in 2005
Published 2 times a year

UDC 502/504+911+57

The journal covers modern achievements in the fields of ecology, biology, geography and nature management. Special attention is paid to research aimed at solving current environmental problems, implementing innovative approaches in the field of environmental protection, as well as generalizing and disseminating international experience in environmental management and sustainable development. The journal covers the results of scientific research in such areas as human ecology, medical and environmental research, biotechnology, constructive geography, ecology and balanced nature management. Considerable attention is paid to issues of environmental monitoring, environmental assessment, application of modern environmental protection technologies, as well as problems of organization and methodology of ecological, biological, geographical and nature protection education.

For scientists and specialists-ecologists, biologists, geographers, as well as for teachers, graduate students, masters and students of higher educational establishments of Ukraine and other countries without any restrictions

Approved for printing by the decision of the Academic Council of V.N. Karazin Kharkiv National University
(Protokol Nr 9, dated May 25, 2026)

Editor-in-chief:
Krainiukov O. M., DSc (Geography), Prof., V.N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine;
Deputy Editor:
Tsapko N. S. PhD (Agriculture), S Scientific research institution «Ukrainian Scientific Research Institute of Environmental Problems», Ukraine;

The Editorial Board

Biedunkova O. O., DSc (Biology), Prof., National University of Water and Environmental Engineering, Ukraine;
Davydenko K. V., PhD**,** Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden;
Maksymenko N. V., DSc (Geography), Prof., V.N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine;
Myronycheva O. S., PhD (Agriculture), PhD (Technical), Luleå University of Technology, Sweden
Nekos A. N., DSc (Geography), Prof., V.N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine;
Pryshchepa A., **M.,** DSc (Agriculture), Prof.,National University of Water Management and Environmental Management, Ukraine;
Tsapko Y. L., DSc (Biology), Prof., National Scientific Center "Institute for Soil Science and Agrochemistry Research named after A.N. Sokolovsky", Ukraine;
Chaplygina A. B., DSc (Biology), Prof., H.S. Skovoroda Kharkiv National Pedagogical University, Ukraine;
Shabanov D. A., DSc (Biology), Prof., V.N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine;
Shkaruba A., PhD, Estonian University of Life Sciences, Estonia.

Editorial Board Address: 6 Svobody Sq., 61022, Kharkiv, V.N. Karazin Kharkiv National University,
The Karazin Institute of Environmental Sciences, office 473a
tel. (057) 707-53-86, 705-09-66, 707-56-36, e-mail: visnykecology@karazin.ua
Web-pages: http://periodicals.karazin.ua/ecology (OJS)
Double-blind peer review was conducted. The authors of the published materials are solely responsible for the selection, accuracy of the facts, proper names, etc.

Media identifier in the Register of the field of Media Entities: R30-04448
(Decision № 1538 dated May 9, 2024 of the National Council of Television and Radio Broadcasting of Ukraine, Protocol № 15)

© V.N. Karazin Kharkiv National University, design, 2026

ЗМІСТ

ЕКОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕОСИСТЕМ

Гололобова О. О., Москвітіна М. Ю.
Рамкова конвенція про охорону та сталий розвиток Карпат: еколого-правовий аналіз виконання Україною зобов'язань у контексті цілей сталого розвитку……... 8

Максименко Н. В., Доля Д. С.
Багаторічна динаміка патогенності погоди та біокліматичного комфорту у місті Харків……... 31

Адаменко С. Я. , Архипова Л. М.
Оцінка якості атмосферного повітря з урахуванням випадкового характеру концентрацій забруднюючих речовин…….. 42

Максименко В. О.
Використання даних Sentinel-2 для компенсаційного моніторингу поверхневих вод України в умовах воєнного стану…….. 54

Караїм О. А.
Індикаторне оцінювання екосистемних послуг прикордонної ділянки річки Стир на основі гідрохімічних показників якості води…….. 66

Кулик М. І. Лісняк А. А., Гембач А. О.
Оцінка якості поверхневих вод річки Сіверський Донець в межах Харківської області у 2024 році…….. 79

Кривицька І. А., Шабанов Д. А., Давиденко К. В., Трущенко О. С.
Екологічна оцінка якості води та стану іхтіофауни Печенізького водосховища…….. 95

Коптєва Т. С.
Геоекологічні особливості формування та розвитку гірничопромислових ландшафтно-технічних систем України…….. 110

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Пузік В. К., Криштоп Є. А.
Методичний підхід до порівняльної оцінки водно-енергетичної стійкості урбанізованих територій на основі DPSIR, ESG та IWE……. 125

Ачасов А. Б., Немошкалов О. М.
Забруднення ґрунтів мілітарних агроландшафтів…… 136

ЗБАЛАНСОВАНЕ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

Бринза Н. О.
Багатокритеріальна оцінка пріоритетності природоохоронних заходів на основі відкритих онлайн-даних……. 148

Малишко Є. О., Чернишов В. В.
Регіональна диференціація екологічних ризиків та природоохоронного фінансування в Україні на основі відкритих даних…….. 159

Безсонний В. Л.
Проєктний підхід до впровадження та оцінювання результативності екологічного менеджменту готельно-ресторанного бізнесу…….. 168

Давидова О. Ю.
Еколого-нутриційне обґрунтування рецептурних компонентів нової технології січених виробів з риби…… 181

Нечепуренко К. Б.
Еколого-економічні аспекти функціонування хлібопекарської промисловості Харківщини в умовах сучасних викликів……...…….. 190

ЕКОЛОГІЧНА ТА ПРИРОДООХОРОННА ОСВІТА

Некос А. Н., Уварова С. Д., Шабалін А. Ю.
Особливості екологічної освіти для дітей дошкільного віку……. 207

Правила для авторів……... 221

CONTENTS

ECOLOGICAL RESEARCHES OF GEOSYSTEM

Gololobova O. O., Moskvitina M. Y.
Carpathian convention: ecological and legal analysis of ukraine's implementation of its obligations in the context of sustainable development goals……. 8

Maksymenko N. V., Dolia D. S.
Long-term dynamics of weather pathogenicity and bioclimatic comfort in the city of Kharkiv……... 31

Adamenko S. Y., Arkhypova L. M.
Assessment of atmospheric air quality considering the stochastic nature of pollutant concentrations…….. 42

Maksymenko V. O.
Use of Sentinel-2 data for compensatory monitoring of surface waters of Ukraine under martial law…….. 54

Karaim O. A.
Indicator-based assessment of ecosystem services in the transboundary section of the Styr river based on hydrochemical water quality indicators……... 66

Kulyk M. I., Lisnyak A. A., Gembach A. O.
Assessment of surface water quality of the Seversky Donets river within Kharkiv region in 2024……. 79

Kryvytska I. A., Shabanov D. A., Davydenko K. V., Trushchenko O. S.
Ecological assessment of water quality and ichthyofauna condition of the Pechenihy reservoir..... 95

Koptieva T. S.
Geoecological features of the formation and development of mining landscape-technical systems of Ukraine…….. 110

ENVIRONMENTAL ECOLOGICAL SAFETY

Puzik V. K., Kryshtop Y. A.
A methodological approach to comparative assessment of water–energy sustainability of urbanized areas based on DPSIR, ESG and IWE……... 125

Achasov A. B., Nemoshkalov O. M.
Soil contamination of military agrolandscapes……... 136

SUSTAINABLE USE OF NATURE

Brynza N. O.
Multi-criterion assessment of the priority of environmental protection measures based on open online data……... 148

Malyshko Y. O., Chernyshov V. V.
Regional differentiation of environmental risks and environmental protection financing in Ukraine based on open data …….. 159

Bezsonnyi V. L.
Project-based approach to the implementation and performance evaluation of environmental management in the hotel and restaurant business…… 168

Davydova O. Yu.
Ecological and nutritional justification of recipe components for a new technology of minced fish products…….. 181

Nechepurenko K. B.
Ecological and economic aspects of the functioning of the bakery industry in Kharkiv region under current challenges……. 190

ECOLOGICAL AND ENVIRONMENTAL EDUCATION

Nekos A. N., Uvarova S. D., Shabalin A.Y.
Features of environmental education for preschool children.…….. 207

Instructions for Authors……..... 221

ЕКОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕОСИСТЕМ

https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-01
УДК: 504:349.6

О. О. ГОЛОЛОБОВА[1], канд. с.-г. наук, доц.,
доцент кафедри екологічного моніторингу та заповідної справи
e-mail: elena.gololobova@karazin.ua ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-5558-2114

М. Ю. МОСКВІТІНА[1],
магістр з екології
e-mail: moskvitina2021de11@student.karazin.ua ORCID ID: https://orcid.org/0009-0007-9680-954X

[1]*Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,*
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

РАМКОВА КОНВЕНЦІЯ ПРО ОХОРОНУ ТА СТАЛИЙ РОЗВИТОК КАРПАТ: ЕКОЛОГО-ПРАВОВИЙ АНАЛІЗ ВИКОНАННЯ УКРАЇНОЮ ЗОБОВ'ЯЗАНЬ У КОНТЕКСТІ ЦІЛЕЙ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Мета. Здійснення еколого-правового аналізу імплементації положень Рамкової конвенції про охорону та сталий розвиток Карпат Україною, а також в оцінці поточного екологічного стану екосистем Карпатського регіону України відповідно до критеріїв та ефективності виконання вимог, визначених цим міжнародним договором.

Методи. Системний аналіз, SWOT-аналіз, вивизначення індексу інсуляризованості.

Результати. Детальний аналіз виконання Рішень 7-ї Конференції Сторін засвідчив прийняття Карпатської рамкової програми з біорізноманіття, активізацію транскордонної співпраці щодо великих хижаків, інтеграцію кліматичної оцінки ризиків у лісове господарство та просування традиційного скотарства до списку ЮНЕСКО НКС. Шляхом систематизації зобов'язань підтверджена пряма відповідність положень протоколів Карпатської конвенції Цілям сталого розвитку ООН. Згідно з результатами SWOT-аналізу пріоритетні зусилля необхідно концентрувати на міжсекторальній співпраці, впровадженні науково обґрунтованого просторового планування та максимальному використанні позитивного досвіду транскордонних проєктів. Розрахункові показники індексу інсуляризованості ПЗФ підтверджують фрагментацію лісових масивів і порушення екологічних зв'язків, особливо у Чернівецькій області. Аналіз екологічних кейсів підтвердив вплив локальних загроз на виконання Конвенції та засвідчив потенціал співпраці держави, громад та міжнародних партнерів.

Висновки. Рамкова конвенція про охорону та сталий розвиток Карпат є визначальним міжнародним механізмом для інтеграції глобальних зобов'язань (ЦСР ООН) у національну природоохоронну політику. Україна демонструє послідовні кроки у впровадженні Протоколів Карпатської конвенції, має значний потенціал для повної та ефективної імплементації Конвенції шляхом посилення міжсекторальної співпраці та впровадження науково обґрунтованого просторового планування.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *Карпатська конвенція, Протоколи, еколого-правовий аналіз, сталий розвиток, інсуляризованість, природно-заповідний фонд, інвазійні види*

Як цитувати: Гололобова О. О., Москвітіна М. Ю. Рамкова конвенція про охорону та сталий розвиток Карпат: еколого-правовий аналіз виконання Україною зобов'язань у контексті цілей сталого розвитку. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2026. Вип. 34. С. 8-30. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-01

In cites: Gololobova, O. O., & Moskvitina, M. Y. (2026). Carpathian convention: ecological and legal analysis of Ukraine's implementation of its obligations in the context of sustainable development goals. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology*, (34), 8-30. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-01 (in Ukrainian)

© Гололобова О. О., Москвітіна М. Ю., 2026

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0

Вступ

Необхідність консолідованої міжнародної співпраці задля збереження уні-кальної природної спадщини Карпатського регіону стала головною передумовою ство-рення Рамкової конвенції про охорону та сталий розвиток Карпат (КК). Карпатський гірський масив є одним із найбільших у Європі, вирізняючись винятковим рівнем біорізноманіття та високою природоохо-ронною цінністю лісових і гірських екосистем.

Історія Конвенції бере початок у 2001 році, коли за активної ініціативи уряду України та підтримки Програми ООН з навколишнього середовища (ЮНЕП) роз-почалися переговори щодо укладення регіональної угоди [1, 2, 3]. Процес переговорів успішно завершився підписанням документа 22 травня 2003 року в Києві представниками семи країн Карпатського регіону: України, Чехії, Польщі, Румунії, Словаччини, Угорщини та тодішньої Сербії і Чорногорії [4].

Україна відіграла визначальну роль у просуванні цієї ініціативи, ставши однією з головних країн-ініціаторів. Після завершення процесу ратифікації Конвенція офіційно набула чинності 4 січня 2006 року [1].

Основною метою Рамкової конвенції про охорону та сталий розвиток Карпат є забезпечення охорони навколишнього середовища, одночасне сприяння сталому соціально-економічному розвитку та підвищення якості життя мешканців Карпатського регіону. Цей документ є рамковою міждержавною угодою, покликаною координувати зусилля країн-учасниць у таких ключових напрямках, як охорона лісів, збереження біорізноманіття, розвиток екологічно відповідального (стійкого) туризму, впровадження екологічно безпечних практик у сільському та лісовому господарстві, а також забезпечення ефективної транскордонної співпраці [1, 2]. Комплексний підхід Конвенції базується на чіткому розумінні нерозривного взаємозв’язку між екологічними, економічними та соціальними складовими розвитку гірських територій. На міжнародному рівні Карпатська конвенція є значущою, оскільки вона стала другою у світі та першою в Європі (після Альпійської конвенції) регіональною угодою, спеціально спрямованою на охорону гірських екосистем [1–4].

Правові засади Карпатської конвенції ґрунтуються на фундаментальних принципах міжнародного екологічного права, охоплюючи принципи сталого розвитку, необхідності міжурядової співпраці, превентивності, зобов'язання щодо збереження біорізноманіття та забезпечення активної участі громадськості [2, 5, 6]. Зі структурної точки зору, Конвенція має класичну будову, що складається з преамбули та низки послідовних тематичних статей, кожна з яких визначає конкретні зобов’язання держав-учасниць. Серед цих зобов’язань виділяються охорона біорізноманіття та раціональне використання природних ресурсів, підтримка стійких практик у лісовому та сільському господарстві, захист ландшафтного різноманіття, розвиток екологічно дружнього туризму, мінімізація негативного впливу транспортної інфраструктури, охорона водних ресурсів, координація просторового планування та підтримка місцевих громад [1].

Реалізація Карпатської конвенції здійснюється за допомогою низки тематичних протоколів, які деталізують її загальні положення та конкретизують регуляторні механізми у таких стратегічних секторах, як охорона біорізноманіття, лісове та сільське господарство, туризм та транспорт. Завдяки цій структурі Конвенція інституціоналізує комплексну систему управління природними ресурсами Карпатського регіону, виступаючи вагомим інструментом для гармонізації екологічної політики між державами-учасницями. Загалом, Конвенція формує цілісну та узгоджену нормативно-правову архітектуру, яка забезпечує ефективну охорону природного потенціалу Карпат, створює фундаментальні умови для їхнього сталого розвитку. Її керівні принципи та положення спрямовані на досягнення необхідного балансу між соціально-економічними потребами суспільства та імперативами збереження довкілля, надійний інституційний механізм у поєднанні з деталізованими тематичними статтями гарантує узгодженість і високу результативність транскордонної співпраці у Карпатах.

Мета дослідження полягає у здійсненні еколого-правового аналізу імплементації положень Рамкової конвенції про охорону та сталий розвиток Карпат Україною, а також в оцінці поточного екологічного стану екосистем Карпатського регіону України відповідно до критеріїв та ефективності виконання вимог, визначених цим міжнародним договором.

Методи дослідження

Задіяно комплекс взаємодоповнюючих наукових методів, що забезпечує можливість всебічного еколого-правового аналізу виконання міжнародних зобов'язань та достовірної оцінки екологічного стану природних екосистем Карпатського регіону.

Зокрема, для теоретичного опрацювання положень Рамкової конвенції та її Протоколів, а також для аналізу відповідної національної правової бази застосовувався метод системного аналізу. Центральним елементом цього системного підходу стала систематизація зобов'язань, визначених у Протоколах, шляхом їхньої кореляції з глобальними Цілями сталого розвитку (ЦСР) ООН. Як інструмент стратегічного планування, використано SWOT-аналіз для забезпечення комплексної оцінки ефективності імплементації положень Протоколів Карпатської конвенції на території України.

Критично важливим елементом оцінки цілісності природно-заповідної мережі стало визначення ступеня інсуляризованості природоохоронних територій Карпатського регіону, який розраховувався за коефіцієнтом інсуляризованості. Розрахунок цього коефіцієнта базується на методологічній розробці М. Д. Гродзинського [7] і слугує важливим індикатором екологічної стійкості мережі, відображаючи її схильність до фрагментації, що має вирішальне значення для довгострокового збереження біорізноманіття.

Результати та обговорення

З метою забезпечення імплементації положень Рамкової конвенції про охорону та сталий розвиток Карпат розроблено низку спеціалізованих протоколів, кожен із яких деталізує окремий пріоритетний напрям природо-охоронної та соціально-економічної політики. Ці Протоколи конкретизують механізми виконання Конвенції та встановлюють стандарти щодо охорони навколишнього середовища, раціонального використання природних ресурсів і сприяння сталому розвитку на території Карпатського регіону [8].

Україна ратифікувала всі супровідні протоколи до Конвенції та наразі здійснює поступову гармонізацію національного законодавства відповідно до їхніх вимог. Однак, процес цієї імплементації зіштовхується з низкою системних викликів, які включають обмежене фінансування, складну безпекову ситуацію в країні, а також нагальну потребу в комплексному оновленні існуючої природо-охоронної політики [9]. Попри ці труднощі, участь України в Конвенції залишається визначальною для забезпечення сталого збереження екосистем Карпат та підтримки ефективної міжнародної екологічної співпраці у цьому регіоні [10].

Важливою складовою Конвенції є її інституційний механізм, який забезпечує операційну діяльність та координацію зусиль. До цього механізму належать Конференція Сторін (як найвищий керівний орган), Комітет з виконання Конвенції, тематичні робочі групи та Секретаріат Конвенції, який функціонує під егідою Програми ООН з навколишнього середовища (ЮНЕП) [2]. Секретаріат відповідає за організаційну роботу між країнами, підготовку необхідної технічної документації, забезпечення комунікації та підтримку міжнародних зустрічей, чим гарантує сталість співпраці та ефективну реалізацію ухвалених рішень. Ці структури спільно забезпечують координацію дій держав, підготовку й ухвалення стратегічних документів, розробку протоколів, моніторинг виконання положень Конвенції, а також сприяють обміну інформацією на регіональному рівні [11]. Окрему роль відіграють тематичні міжнародні робочі групи, сфера компетенції яких охоплює питання охорони біорізноманіття, сталого лісового господарства, просторового планування, транспорту, сталого туризму, адаптації до зміни клімату та контролю інвазійних видів. Ці групи розробляють фахові технічні рекомендації, індикатори моніторингу, методики оцінки стану довкілля й практичні інструменти, які можуть бути адаптовані країнами у свою національну політику [12]. Додаткове значення для реалізації Конвенції мають міжнародні проєкти та програми Європейського Союзу, що спрямовані на збереження природних ресурсів, розвиток сталого туризму, просторове планування та вдосконалення екологічної політики, завдяки чому країни отримують необхідну технічну підтримку, фінансування та доступ до сучасних наукових рішень.

Особливе значення в інституційному механізмі реалізації Конвенції має Карпатська

мережа охоронюваних територій (CNPA). Ця мережа функціонує як інтегрована структура, що об'єднує національні природні парки, заповідники та інші природоохоронні об'єкти різних країн Карпатського регіону. Основною метою CNPA є забезпечення спільного управління природними ресурсами, сприяння формуванню транскордонних екологічних коридорів та обміну експертним досвідом між фахівцями. Завдяки діяльності CNPA досягається гармонізований та цілісний підхід до охорони лісових і гірських екосистем у межах усієї Карпатської гірської системи [13].

В межах Рамсарської та Карпатської конвенцій функціонує Карпатська ініціатива щодо водно-болотних угідь Карпат (CWI), яка започаткована з ініціативи Словацької Республіки у лютому 2004 року. Її ключова мета полягає у налагодженні співпраці між цими конвенціями та їхніми Сторонами задля забезпечення збереження та сталого використання водно-болотних екосистем у Карпатському регіоні [14].

Одним із найбільш значущих результатів виконання Конвенції стало прийняття Карпатської рамкової програми з біорізноманіття (Carpathian Biodiversity Framework, CBF) на сьомій Конференції Сторін (COP7) у 2023 році. Цей документ є першим регіональним інструментом для імплементації глобальних цілей Куньмін-Монреальської рамкової програми з біорізноманіття на рівні Карпат. CBF закріплює «Карпатську візію 2050», яке визначає регіон як зразок сталого розвитку та гармонії з природою. Впровадження цієї Рамкової програми має на меті сприяння спільним транснаціональним заходам, створюючи синергію між регіональними завданнями та глобальними цілями щодо клімату і Цілями сталого розвитку (ЦСР) ООН. Успішна реалізація CBF демонструє роль Карпатської конвенції як модельного механізму для інших гірських регіонів [15].

Карпатська рамкова програма з біорізноманіття (CBF) є однією з найважливіших стратегічних програм 7-ї Конференції Сторін (COP7) Карпатської конвенції [16]. Повний перелік прийнятих Рішень COP7, що охоплюють усі сфери співпраці, а також аналіз їхнього виконання та відповідних пунктів Програми роботи на 2024–2026 роки детально представлено у Таблиці 1.

Імплементація Рамкової конвенції про охорону та сталий розвиток Карпат в Україні здійснюється шляхом синтезу міжнародних зобов’язань, чинних національних правових інструментів та стратегічних програм, сфокусованих на довгостроковому збереженні природного потенціалу Карпатського регіону. Загальнодержавний підхід України передбачає поетапне впровадження ключових положень Конвенції та супровідних протоколів до неї в галузеві політики, зокрема в екологічну, лісову, аграрну, туристичну й транспортну сфери, а також обов'язкове інтегрування екологічних вимог у процеси просторового планування територій Карпат.

Ключовим елементом українського підходу до реалізації Конвенції є гармонізація національного законодавства з міжнародними екологічними стандартами, визначеними цим рамковим документом. Україна ратифікувала усі п'ять чинних протоколів, які конкретизують напрями діяльності у сферах охорони біорізноманіття, сталого лісового господарства, екотуризму, транспорту та розвитку сільських територій. [1]. Цей акт забезпечує формальну інтеграцію положень Конвенції до національної системи управління природними ресурсами і накладає на державу пряме зобов'язання щодо розроблення та імплементації відповідних галузевих політик. У цьому контексті, пріоритетним завданням є посилення екологічної мережі Карпат, забезпечення неперервності природних ландшафтів та мінімізація процесів фрагментації природних середовищ [17].

Особливе місце у контексті реалізації Конвенції посідає національна система природоохоронних територій України, яка охоплює національні природні парки, заповідники та заказники Карпатського регіону. Саме через ефективний розвиток і функціонування цих територій Україна імплементує положення протоколів, що стосуються охорони біорізноманіття, запобігання деградації лісів, стимулювання екотуризму та підтримки місцевих громад. Крім того, участь України у транскордонних природоохоронних ініціативах має вирішальне значення для узгодження підходів до охорони гірських екосистем із сусідніми державами. Першим із цих ключових документів є Протокол про збереження і стале використання біологічного та ландшафтного різноманіття, який було прийнято у 2008 році на Конференції Сторін у Бухаресті та ратифіковано Україною у 2013 році [8, 18]. Цей документ стратегічно спрямований на збереження видової та генетичної різноманітності, охорону природних сере-

Таблиця 1

Аналіз виконання Рішень 7-ї Конференції Сторін Карпатської конвенції (COP7) та Програми роботи на 2023–2026 роки

Table 1.

Analysis of the implementation of the Decisions of the 7th Conference of the Parties to the Carpathian Convention (COP7) and the Work Program for 2023–2026

Рішення COP7 (Decision COP7)	Досягнення Achievements	Вектор на 2024–2026 рр. Vector for 2024–2026
COP7/1. Впровадження Карпатської конвенції (Implementation of the Carpathian Convention)	Прийнято Карпатську рамкову угоду про біорізноманіття (CBF) та «Карпатську візію 2050». CBF визнано першим регіональним інструментом цілей Куньмін-Монреальської рамкової програми з біорізноманіття на рівні Карпат	Активна імплементація CBF. Розробка проєктної пропозиції для GBF для посилення збереження біорізноманіття в Українських Карпатах
COP7/2. Співпраця з регіональними та місцевими органами влади. (Cooperation with the regional and local authorities)	Надана підтримка проєкту «Центральні гори» (Interreg Central Europe), сфокусованого на управлінні гірськими територіями	Фіналізація та використання Спільної стратегії проєкту для зміцнення транскордонного управління гірськими районами
COP7/3. Співпраця з Європейським Союзом (Cooperation with the European Union)	Надана підтримка низці проєктів ЄС. Ведеться розробка пропозиції для LIFE Strategic Nature Project (SNaP)	Подальше консультування щодо LIFE SNaP для забезпечення довгострокового фінансування
COP7/4 Співпраця з ЮНЕП (Cooperation with the United Nations Environment Programme)	Участь у засіданнях координаційних центрів ЮНЕП. Організовано «Ярмарку гірських інновацій» (жовтень 2023)	Подальше програмне зміцнення співпраці з ЮНЕП
COP7/5. Співпраця з іншими конвенціями та міжнародними органами (Cooperation with other conventions and international bodies)	Підтримка постійного контакту з Альпійською конвенцією (АК) та обмін досвідом з Андською гірською ініціативою	Посилення співпраці з АК (особливо під час італійського головування 2025–2026). Поширення досвіду КК на глобальному рівні
COP7/6. Куньмін-Монреальської рамкової програми з біорізноманіття на рівні Карпат (Implementation of the Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework (KMGBF)	CBF забезпечує пряму локалізацію глобальних цілей	Впровадження цілей рамкової програми через CBF та LIFE Strategic Nature Project
COP7/7 & COP7/19. Освіта для сталого розвитку та підвищення обізнаності (Education for Sustainable Development (ESD) & Raising awareness)	Успішне завершення проєкту «Зміцнення мережі ESD». (Освіти для сталого розвитку). Офіційне визнання Карпатської експертної мережі з ESD. Активне співробітництво з мережами UNESCO ESD-Net та ЄЕК ООН з ESD	Організація Освітнього фестивалю «Кроки вперед» у Кошице (листопад 2024 р.) з акцентом на рамці GreenComp. 3-ій Карпатський семінар з ESD у Сербії (2025 р.)
COP7/9. Збереження та стале використання біорізноманіття (Conservation and Sustainable Use of Biological and Landscape Diversity)	Великі хижаки (ВХ): Відновлено Експертну групу з ВХ. Спільна конференція з АК з управління ВХ. Екозв'язаність: Активна участь у проєкті NaturaConnect та підтримка BioLine. Карпатська ініціатива з водно-болотних угідь (CWI): інтеграція у CBF	Розробка та схвалення Стратегії щодо карпатської рисі. Фіналізація тематичних рекомендацій з моніторингу ВХ. CWI: співпраця щодо призначення нових Рамсарських угідь
COP7/12. Стале сільське господарство та розвиток сільських територій (Sustainable Agriculture and Rural Development)	Активна співпраця з IYRP 2026 (Міжнародний рік пасовищ і скотарів 2026). Проведено зустріч щодо включення карпатського скотарства до Списку нематеріальної культурної спадщини ЮНЕСКО (НКС)	Підготовка та подання спільного файлу «Збереження карпатського скотарства» до Реєстру належних практик збереження ЮНЕСКО НКС

Проловження таблиці 1

COP7/13 & COP7/18. Стале лісове господарство та Зміна клімату (Sustainable Forest Management & Climate Change)	Завершення роботи над форматом «Оцінки ризиків зміни клімату та варіантів адаптації» для карпатських лісів. Підтримка затвердження проєкту ForestConnect (кліматично-орієнтована лісова зв'язаність)	Проведення наступного засідання РГ «Ліси» (2025). Впровадження рекомендацій оцінки кліматичних ризиків для підвищення кліматичної стійкості лісових екосистем
COP7/14. Сталий транспорт та інфраструктура, промисловість та енергетика (Sustainable Transport and Infrastructure, Industry and Energy)	Участь Секретаріату у Міжнародній конференції Infrastructure & Ecology Network Europe (IENE) (вересень 2024), присвяченій біорізноманіттю та транспортній інфраструктурі	Пошук нових шляхів посилення міжгалузевої та міжнародної співпраці для зменшення впливу інфраструктури та забезпечення екологічної зв'язаності
COP7/15. Сталий туризм (Sustainable Tourism)	Підтримка проєкту «Центральні гори» у частині, що стосується туризму	Розробка та прийняття Комплексної робочої програми для Карпатської платформи сталого туризму (CSTP) Впровадження Набору індикаторів для моніторингу впливу туризму
COP7/16. Культурна спадщина та традиційні знання (Cultural Heritage and Traditional Knowledge)	Спрямування зусиль на популяризацію та захист традиційних пастуших практик як елементу культурної спадщини	Робота над просуванням карпатського скотарства у форматі ЮНЕСКО НКС (див. COP7/12)
COP7/17. Моніторинг та раннє попередження (Monitoring and Early Warning)	Оновлення робочого плану співпраці Секретаріату з Європейським агентством з навколишнього середовища (EEA)	Продовження тісної співпраці з EEA для інтеграції спільних інформаційних систем та підтримки моніторингу

довищ існування, підтримку екологічної мережі, відновлення деградованих екосистем та контроль інвазійних видів. Значна увага в Протоколі приділяється необхідності створення системи моніторингу та розвитку транскордонної співпраці для забезпечення охорони рідкісних і вразливих видів.

Важливим регуляторним інструментом є Протокол про стале управління лісами, який був ухвалений у 2011 році в Братиславі та ратифікований Україною у 2012 році. Цей документ встановлює основоположні принципи екологічно відповідального лісоуправління, регламентує процеси відновлення лісових масивів, забезпечує гармонізацію лісового моніторингу між країнами, а також визначає заходи, спрямовані на протидію незаконним рубкам та мінімізацію антропогенного навантаження на чутливі гірські лісові екосистеми [8].

Враховуючи стратегічне значення туристичного сектору для соціально-економічного розвитку Карпатського регіону, у 2011 році було затверджено Протокол про сталий туризм, ратифікований Україною у 2013 році [8, 19]. Основні положення цього документа спрямовані на інституціоналізацію екологічно відповідального туристичного сектору, стимулювання розвитку інфраструктури з мінімальним антропогенним впливом на довкілля, забезпечення збереження культурної спадщини та надання комплексної підтримки місцевим громадам. Протокол чітко акцентує на необхідності досягнення збалансованого співвідношення між інтенсивністю туристичної діяльності та вимогами природоохоронної політики.

У 2014 році було прийнято Протокол про сталий транспорт, який також був ратифікований Україною, що підтверджується офіційним статусом, опублікованим Секретаріатом Карпатської конвенції. Цей документ визначає принципи екологічно дружніх перевезень, ставить за мету мінімізацію негативного впливу транспортної інфраструктури на довкілля, сприяє покращенню мобільності у гірських районах та стимулює розробку й впровадження низьковуглецевих транспортних рішень [1, 8].

Найновішим регуляторним документом є Протокол про сталий розвиток сільського господарства та сільських територій, який був ухвалений у 2017 році в Ліллегаммері (Норвегія) і, згідно з даними Секретаріату, також був ратифікований Україною. Цей Протокол стратегічно спрямований на впро-

вадження екологічно безпечних аграрних практик, стимулювання розвитку органічного землекористування, забезпечення збереження агробіорізноманіття, сприяння раціональному використанню земель та надання комплексної підтримки сталому розвитку сільських громад Карпатського регіону [1, 8].

Зважаючи на те, що Карпатська конвенція та її супровідні протоколи фактично становлять правовий фундамент для забезпечення регіонального сталого розвитку, виникає імперативна потреба у чіткій ідентифікації кореляції між положеннями цих документів та глобальними Цілями сталого розвитку (ЦСР) ООН [20]. Кожен із тематичних Протоколів прямо орієнтує зусилля держав-Сторін на досягнення конкретних підцілей, артикульованих у Порядку денному 2030. Систематизація цих зобов'язань, що наочно демонструє функціонування Протоколів як ефективного правового механізму для імплементації ЦСР, представлена у Таблиці 2.

У сукупності, ці п'ять тематичних протоколів створюють комплексну нормативно-правову основу для практичної реалізації положень Карпатської конвенції. Вони трансформують її загальні рамкові положення у практичні інструменти ефективного управління біоресурсами, лісами, транспортною системою, туристичною діяльністю та сільським господарством регіону. Імплементація цих протоколів створює гармонізацію екологічної політики держав-учасниць і забезпечує міцне підґрунтя для сталого розвитку Карпатського регіону, базуючись на єдиних стандартах та узгоджених транскордонних підходах.

Нормативно-правове забезпечення імплементації Рамкової конвенції про охорону та сталий розвиток Карпат в Україні характеризується поетапним формуванням та охоплює як базові правові акти 1990-х років, так і сучасну документацію, спрямовану на гармонізацію національної політики з міжнародними зобов'язаннями держави. Зокрема, первинний правовий фундамент державної політики розвитку гірських територій було закладено у 1995 році ухваленням Закону України «Про статус гірських населених пунктів в Україні» [21] та відповідною постановою Кабінету Міністрів України від 11 серпня 1995 року № 647 «Про перелік населених пунктів, яким надається статус гірських» [22]. Ці нормативні акти визначили спеціальний правовий статус таких територій та підкреслили необхідність застосування диференційованих підходів до регулювання природокористування, соціального розвитку та забезпечення екологічної безпеки.

Ухвалення постанови Кабінету Міністрів України № 391 «Про затвердження Порядку здійснення державного моніторингу довкілля» [23] інституціоналізувало базові правові механізми для ведення екологічного моніторингу. Цей механізм передбачає збір, аналіз та подальшу передачу інформації щодо стану природних ресурсів, динаміки екосистем та прояву небезпечних геологічних процесів. Створення такої системи спостережень є прямою вимогою Карпатської конвенції, яка наголошує на необхідності науково обґрунтованого моніторингу як передумови для прийняття ефективних управлінських рішень стосовно природних ресурсів і збереження екосистем гірських регіонів. Подальша еволюція національної нормативної бази свідчить про прагнення держави модернізувати та деталізувати вимоги, закладені в попередніх правових актах.

Фундаментальним нормативно-методичним актом у сфері охорони лісових екосистем є Методика визначення належності лісових територій до пралісів, квазіпралісів і природних лісів, затверджена Наказом Міністерства екології та природних ресурсів України №161 від 18.05.2018 року [24]. Її розробка стала важливим кроком у формуванні правових механізмів збереження найбільш цінних природних лісів, які є ядром біорізноманіття Українських Карпат та інших регіонів. Цей документ виконує роль комплексного інструменту, який ефективно інтегрує наукові критерії ідентифікації пралісових масивів із відповідними правовими процедурами надання їм охоронного статусу.

Зазначена Методика має суттєве юридичне значення, оскільки вона встановлює єдиний офіційно визнаний алгоритм для ідентифікації пралісів, квазіпралісів і природних лісів. Це є обов'язковою передумовою для подальшого переведення таких територій до категорії особливо охоронних.

Таблиця 2

Протоколи Рамкової конвенції про охорону та сталий розвиток Карпат як правовий механізм досягнення завдань Цілей сталого розвитку (ЦСР) ООН

Table 2

Protocols of the Framework Convention on the Protection and Sustainable Development of the Carpathians as a legal mechanism for achieving the UN Sustainable Development Goals (SDGs)

Протокол до Карпатської конвенції (Protocol to the Carpathian Convention)	**Предмет регулювання (Subject of regulation)**	**Реалізовані Цілі Сталого Розвитку (ЦСР) ООН (UN Sustainable Development Goals (SDGs) achieved)**
Протокол про збереження і стале використання біологічного та ландшафтного різноманіття (2008 р.) Protocol on the Conservation and Sustainable Use of Biological and Landscape Diversity (2008)	Збереження екосистем, видів та генетичного різноманіття; охорона ландшафтів; створення та управління Карпатською мережею природоохоронних територій (CNPA).	**ЦСР 15**: Збереження екосистем суші (зокрема **15.1.** Забезпечити збереження, відновлення та стале використання наземних і внутрішніх прісноводних екосистем).
Протокол про стале управління лісами (2011р.) Protocol on Sustainable Forest Management (2011)	Забезпечення стійкого, багатофункціонального та екологічно відповідального управління лісовими ресурсами, охорона пралісів, посилення ролі лісів як поглиначів вуглецю.	**ЦСР 15**: Збереження екосистем суші (зокрема, завдання **15.2** – стале управління лісами); **ЦСР 13**: Пом'якшення наслідків зміни клімату (зв'язок з поглинанням CO_2; **ЦСР 12**: Відпові-дальне споживання та виробництво (стале використання природних ресурсів).
Протокол про сталий туризм (2011 р.) Protocol on Sustainable Tourism (2011)	Сприяння розвитку екологічного та сталого туризму в Карпатах, що приносить економічну користь місцевим громадам та зберігає природну та культурну спадщину.	**ЦСР 8**: Гідна праця та економічне зростання (зокрема, завдання 8.3 – підвищити рівень зайнятості населення); **ЦСР 11**: Сталі міста та спільноти (зокрема, завдання **11.6** – забезпечити розробку і реалізацію стратегій місцевого розвитку, спрямованих на економічне зростання, створення робочих місць, розвиток туризму, рекреації, місцевої культури і виробництво місцевої продукції).
Протокол про сталий транспорт (2014 р.) Protocol on Sustainable Transport (2014)	Створення збалансованої, екологічно чистої та багатомодальної транспортної мережі, зменшення негативного впливу транспортної інфраструктури на екосистеми та ландшафти.	**ЦСР 9**: Промисловість, інновації та інфраструктура (завдання **9.1** – розвиток якісної, надійної та сталої інфраструктури); **ЦСР 11**: Сталі міста та спільноти (безпечний та доступний транспорт); **ЦСР 13**: Пом'якшення наслідків зміни клімату (зменшення викидів від транспорту).
Протокол про сталий розвиток сільського господарства та сільських територій (2017 р.) Protocol on Sustainable Agriculture and Rural Development (2017)	Підтримка традиційного та екологічно чистого сільського господарства; сприяння розвитку сільських територій, збереження агробіорізноманіття, покращення умов життя та зменшення бідності серед сільського населення.	**ЦСР 2**: Подолання голоду. **2.1** (Забезпечити доступність збалансованого харчування на рівні науково обґрунтованих норм для всіх верств населення); **ЦСР 15** (Збереження екосистем суші, зокрема **15.3.** Відновити деградовані землі та ґрунти з використанням інноваційних технологій; **15.4.** Забезпечення збереження гірських екосистем та їхнього біорізноманіття, агроландшафтів).

Саме завдяки цьому нормативно-методичному документу забезпечується належна реалізація положень Лісового кодексу України, зокрема статті 39-1, яка передбачає встановлення особливого режиму охорони для цих лісів. Крім того, Наказ №161 прямо сприяє виконанню міжнародних зобов'язань України, включаючи положення Конвенції про біологічне різноманіття та Карпатської конвенції, які наголошують на імперативі збереження природних лісових екосистем у їхньому автентичному стані [24].

У цьому документі закладено триріневий підхід до визначення категорії лісової ділянки, що забезпечує об'єктивність та всебічність оцінювання. На першому етапі виконується камеральний аналіз, під час якого на основі матеріалів лісовпорядкування, даних про історію господарського використання та вікову структуру деревостанів ідентифікуються ділянки з потенційними ознаками природності. Цей попередній етап дозволяє встановити характеристики, які можуть свідчити про відсутність значних антропогенних втручань, що є принциповою вимогою для віднесення лісів до категорій пралісів і квазіпралісів [24].

Другий етап передбачає проведення польових обстежень, які є центральною та визначальною частиною процедури, оскільки саме вони фіналізують, чи відповідає ділянка критеріям однієї з трьох категорій. Під час цих натурних досліджень здійснюється оцінка показників природного походження деревостанів, їхньої структури, наявності мертвої деревини різних стадій розкладу, фіксуються сліди лісогосподарської діяльності, а також оцінюються особливості просторової організації лісу. Саме цей етап створює правову основу для віднесення лісової ділянки до відповідної екологічної категорії, адже зафіксовані у спеціальному бланку індикатори слугують документальним доказом її природності чи її порушення [24].

На завершальному етапі процедури результати проведеного аналізу узагальнюються, на підставі чого формується офіційний висновок. Цей висновок набуває юридичного значення, оскільки є безпосередньою підставою для зміни правового режиму лісової ділянки. У разі підтвердження статусу пралісу або квазіпралісу, відповідна територія автоматично переходить під посилений природоохоронний режим, що категорично забороняє будь-які рубки, будівництво шляхів, інтенсивне природокористування та інші види діяльності, здатні завдати шкоди екосистемі [24].

Документ також врегульовує процедуру вирішення спорів щодо визначення статусу лісових масивів: у випадку незгоди лісокористувача з висновками передбачається проведення повторної експертизи із залученням міжвідомчої комісії, при цьому будь-які господарські роботи на спірній ділянці припиняються на період перегляду. Такий підхід повністю відповідає основоположному принципу екологічного права – принципу запобіжності, який вимагає збереження природного об'єкта до моменту встановлення остаточного рішення. Фактично це гарантує охоронний статус території навіть за умови тимчасової невизначеності, мінімізуючи ризики знищення унікальних лісових екосистем.

Методика має винятково важливе значення у правозастосуванні: включення ділянки до категорії пралісів чи квазіпралісів суттєво підвищує юридичну відповідальність за будь-які порушення природоохоронного режиму, оскільки такі території розглядаються як особливо цінні природні об'єкти. Її положення активно використовуються у судових спорах щодо правомірності рубок, встановлення меж лісових ділянок природоохоронного призначення та в процесах розслідувань фактичного стану природних лісів [24].

Таким чином, Методика, затверджена Наказом №161, набуває системо-утворюючого значення для формування національної політики у сфері охорони природних лісів. Вона забезпечує науково обґрунтований, юридично прозорий та екологічно виважений підхід до ідентифікації пралісів, створюючи надійну правову базу для їхнього подальшого захисту. Завдяки цьому документу екологічні критерії природності отримують чітке правове закріплення, а держава забезпечується ефективним механізмом збереження найбільш цінних лісових екосистем України.

Розпорядження Кабінету Міністрів України від 21 листопада 2018 р. № 892-р «Деякі питання збереження української

частини природного об'єкта всесвітньої спадщини ЮНЕСКО «Букові праліси і давні ліси Карпат та інших регіонів Європи»» стратегічно спрямоване на забезпечення охорони унікальних пралісових екосистем, які становлять ядро природної спадщини Карпат. Розпорядження деталізує механізми охорони територій світової спадщини та забезпечує оновлення підходів, закладених у попередніх нормативно-правових актах [25].

Наступним етапом у формуванні сучасної державної політики щодо імплементації Рамкової конвенції про охорону та сталий розвиток Карпат стало видання Указу Президента України від 22 липня 2019 р. № 543/2019 «Про розвиток регіону українських Карпат» [26]. Цей правовий акт зобов'язав Уряд розробити та подати на затвердження комплексну державну програму регіонального розвитку, яка мала бути повністю узгоджена з вимогами Карпатської конвенції, фокусуючись на забезпеченні екологічної збалансованості, посиленні транскордонної співпраці та підвищенні якості життя населення гірських територій. На виконання цього стратегічного Указу була підготовлена та ухвалена Постанова Кабінету Міністрів України від 20.10.2019 № 880, якою затверджено Державну програму розвитку регіону українських Карпат на 2020–2022 роки. Цей нормативно-правовий акт визначає стратегічні напрями та механізми збалансованого соціально-економічного розвитку регіону, інтегруючи необхідність збереження природних екосистем, лісових і водних ресурсів, ландшафтів та культурної спадщини. Подібна інтеграція економічних пріоритетів і природоохоронних імперативів повністю корелює з основоположними принципами сталого розвитку, що закріплені у статтях 2–4 Карпатської конвенції [27].

У цілому, постанова Кабінету Міністрів України про затвердження Державної програми розвитку регіону українських Карпат на 2020–2022 роки набуває суттєвого еколого-правового значення, оскільки вона формує нормативну основу для виконання міжнародних зобов'язань України, що випливають із Карпатської конвенції. Цей документ визначає інструменти екологічно орієнтованого розвитку регіону та створює цілісну державну політику щодо охорони природних комплексів Карпат. Програма ефективно поєднує завдання екологічної безпеки, економічного розвитку та збереження природної спадщини, що робить її одним із визначальних документів національної природоохоронної політики.

Значну роль у вдосконаленні еколого-правової політики відіграє наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України «Про затвердження Переліку інвазійних видів дерев із значною здатністю до неконтрольованого поширення, заборонених до використання у процесі відтворення лісів» [28]. Цей документ стратегічно спрямований на запобігання проникненню та поширенню інвазійних видів, що становить пряму екологічну загрозу для цінних гірських лісових екосистем. Він конкретизує загальні вимоги щодо біобезпеки, передбачені Карпатською конвенцією, і значно підсилює ефективність її виконання на практичному рівні.

Таким чином, наявна нормативна база України – від ранніх законодавчих актів 1990-х років до сучасних документів, що регулюють питання охорони пралісів, контролю інвазійних видів та екологічного моніторингу, – формує багаторівневу та цілісну систему правового забезпечення виконання положень Карпатської конвенції. Саме на цей правовий фундамент спирається подальший еколого-правовий аналіз важливих актів, які мають визначальне значення для охорони Карпатського регіону.

Систематизований огляд тематичних пріоритетів, визначених Національними координаційними центрами семи країн-учасниць для імплементації положень Карпатської конвенції, фіксує конкретні Статті, на які держави-Сторони звернули першочергову увагу у своїх національних стратегіях та програмах. Зокрема, Україна сфокусувала свої зусилля на кількох ключових тематичних напрямах: Стаття 4 (Охорона природи), Стаття 7 (Стале сільське та лісове господарство) та Стаття 11 (Культурна спадщина та традиційні знання). Це свідчить про те, що пріоритети України на ранніх етапах імплементації були зосереджені на фундаментальних екологічних і культурних аспектах Конвенції [18].

Методологія SWOT-аналізу використовується для проведення комплексної оцінки внутрішніх сильних і слабких сторін, а також зовнішніх можливостей і загроз, пов'язаних із

реалізацією положень кожного з Протоколів Карпатської конвенції. Застосування цього методу дозволяє чітко ідентифікувати основні напрями вдосконалення державної політики, визначити пріоритетні заходи та оцінити ризики, що впливають на якість виконання міжнародних зобов'язань. Для узагальнення результатів оцінки імплементації протоколів Рамкової конвенції про охорону та сталий розвиток Карпат, а також для виявлення основних проблем, переваг, потенційних можливостей та ризиків їхньої реалізації в Україні, нижче подано візуалізацію здійсненого SWOT-аналізу для кожного з протоколів. На рисунку 1 представлено результати SWOT-аналізу Протоколу про збереження і стале використання біологічного та ландшафтного різноманіття, де узагальнено його ключові переваги та недоліки, а також потенційні можливості його реалізації та зовнішні загрози.

SWOT-аналіз, застосування якого дозволяє систематизовано виокремити ключові характеристики Протоколу про стале управління лісами (рис. 2), також наочно демонструє ключові внутрішні та зовнішні фактори, що впливають на реалізацію Протоколу про сталий туризм (рис. 3), систематизуючи його основні сильні та слабкі сторони, а також потенційні можливості та зовнішні загрози. SWOT-аналіз реалізації Протоколу про сталий транспорт (рис. 4), Результати аналізу реалізації Протоколу про сталий розвиток сільського господарства (рис. 5).

SWOT-аналіз для всіх протоколів Карпатської конвенції констатує наявність значного потенціалу для вдосконалення механізмів її імплементації в Україні. Попри існуючі внутрішні слабкі сторони – зокрема, недостатнє фінансування, фрагментарність



Рис. 1 – Результати SWOT-оцінки реалізації положень Протоколу щодо збереження і сталого використання біологічного та ландшафтного різноманіття
Fig. 1 – Results of the SWOT assessment of the implementation of the Protocol on the Conservation and Sustainable Use of Biological and Landscape Diversity



Рис. 2 – SWOT-аналіз реалізації Протоколу про стале управління лісами
Fig. 2 – SWOT-analysis of the Implementation of the Protocol on Sustainable Forest Management



Рис. 3 – SWOT-аналіз реалізації Протоколу про сталий туризм
Fig. 3 – SWOT assessment of the realization of the provisions of the Protocol on Sustainable Tourism



Рис. 4 – SWOT-аналіз реалізації Протоколу про сталий транспорт
Fig. 4 – SWOT assessment of the realization of the provisions of the Protocol on Sustainable Transport



Рис. 5 – SWOT-аналіз реалізації Протоколу про сталий розвиток сільського господарства
Fig. 5 – SWOT assessment of the realization of the provisions of the Protocol on Sustainable Agriculture and Rural Development

моніторингу, інституційні бар'єри та негативний вплив військових дій, – зовнішні можливості, що пов'язані з активізацією транскордонної співпраці, євроінтеграційними процесами, розвитком екологічних мереж та впровадженням сучасних підходів до природокористування, створюють сприятливі умови для підвищення ефективності реалізації Конвенції.

Отримані результати комплексного оцінювання можуть бути без-посередньо використані для стратегічного планування пріоритетних заходів державної природоохоронної політики у Карпатському регіоні.

У Рамковій конвенції про охорону та сталий розвиток Карпат гірський масив Українських Карпат розглядається як незамінний структурний компонент Пан'європейської екологічної мережі, що детермінує необхідність впровадження узгодженої політики збереження природи та транскордонної кооперації. Положення Конвенції окреслюють стратегічний вектор у сферах збереження біологічного різноманіття, сталого управління лісовими й водними ресурсами, розвитку екологічно відповідальної туристичної діяльності та адаптації до кліматичних змін, що має безпосередній вплив на цілісність екосистем регіону [29, 30]. Зокрема, Природно-заповідний фонд (ПЗФ) Карпатського регіону виступає першочерговим інструментом для збереження біорізноманіття *in situ*, забезпечення охорони рідкісних та вразливих екосистем, а також безпосередньої реалізації міжнародних зобов'язань України, що випливають із Карпатської конвенції. Саме ця система взаємопов'язаних територій (заповідники, національні парки, регіональні ландшафтні парки та заказники) гарантує довготривалу охорону найбільш цінних природних комплексів – включаючи пралісові масиви, альпійські та субальпійські луки, високогірні болота, гірські річкові системи та лісові екосистеми з високим індексом природності [31, 32].

Динаміка розвитку Природно-заповідного фонду (ПЗФ) Карпат протягом останніх десятиліть є важливим індикатором ефективності державної природоохоронної політики та виконання екологічних імперативів міжнародних угод. Такі показники, як експансія територій ПЗФ, трансформація їхньої структури, площа пралісових і старовікових лісів, а також ступінь фрагментації природних масивів, детермінують реальний стан екологічної безпеки регіону [32]. Динаміка площ природно-заповідного фонду в областях Карпатського регіону (рис.6), демонструє ці зміни – стійку тенденцію до збільшення протягом періоду 1998–2020 рр. в усіх областях. При цьому найбільший абсолютний приріст був зафіксований в Івано-Франківській та Закарпатській областях, тоді як Чернівецька область характеризується найнижчими показниками експансії ПЗФ.

Для комплексної оцінки ефективності реалізації цільових положень Карпатської конвенції доцільним є поглиблений аналіз структури та рівня заповідності цих адміністративних одиниць. Такий диференційований підхід дозволяє проаналізувати поточну структуру ПЗФ, оцінити тенденції його розвитку, рівень територіальної цілісності, екологічну репре-зентативність та функціональну ефективність природоохоронних територій за показниками (табл. 3), які

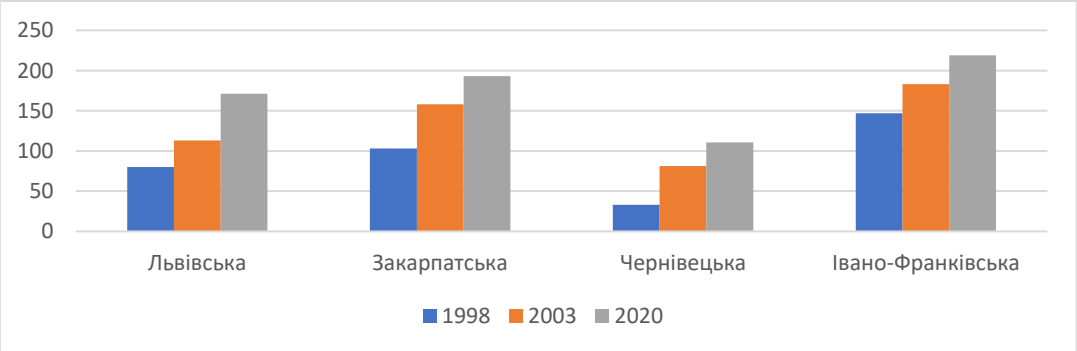


Рис. 6 – Динаміка зміни площі природно-заповідного фонду Карпатського регіону по областям
Fig. 6 – Dynamics of changes in the area of the Nature Reserve Fund of the Carpathian region by regions

Таблиця 3

Розподіл територій та об'єктів природно-заповідного фонду в адміністративних межах областей Карпатського регіону

Table 3

Distribution of territories and objects of the Nature Reserve Fund within the administrative boundaries of the Carpathian region's oblasts (regions)

Область Region	Кількість об'єктів ПЗФ Number of Nature Reserve Fund Objects	Загальна площа об'єктів ПЗФ, га Total Area of Nature Reserve Fund Objects, ha	Показник заповідності регіону, % Regional Protected Area Index, %
Львівська lviv region	408	180236,6	8,3
Закарпатська Transcarpathian region	504	206383,7	16,2
Чернівецька Chernivtsi region	349	104326,4	12,8
Івано-Франківська Ivano-Frankivsk region	526	223852,1	16,1

дозволяють здійснити порівняльну оцінку рівня заповідності та ступеня фрагментації природоохоронних об'єктів у межах регіону.

Аналіз визначив суттєву диференціацію у рівнях заповідності між проаналізованими областями (рис. 7, рис. 8). Найвищий показник заповідності спостерігається у Закарпатській області, що, ймовірно, корелює з її значним розташуванням у високогірній місцевості. Водночас, найнижчий відсоток територій природно-заповідного фонду зафіксовано у Львівській області. Незважаючи на те, що Чернівецька область характеризується найменшою абсолютною кількістю заповідних об'єктів, її частка заповідних територій зберігається на середньому рівні у порівнянні з іншими регіонами.

Отримані результати оцінки стану Природно-заповідного фонду (ПЗФ) Карпатського регіону України верифікують наявність вагомого практичного впливу положень Карпатської конвенції на національну екологічну політику. Основна місія Конвенції полягає у довгостроковому збереженні унікальних природних комплексів Карпат та забезпеченні гармонійного поєднання природоохоронних імперативів із соціально-економічними інтересами регіону. У цьому контексті, показники заповідності, які варіюються в діапазоні 8–16%, свідчать про значний потенціал для подальшої експансії природоохоронних територій, особливо у Львівській області, де рівень заповідності наразі залишається найнижчим

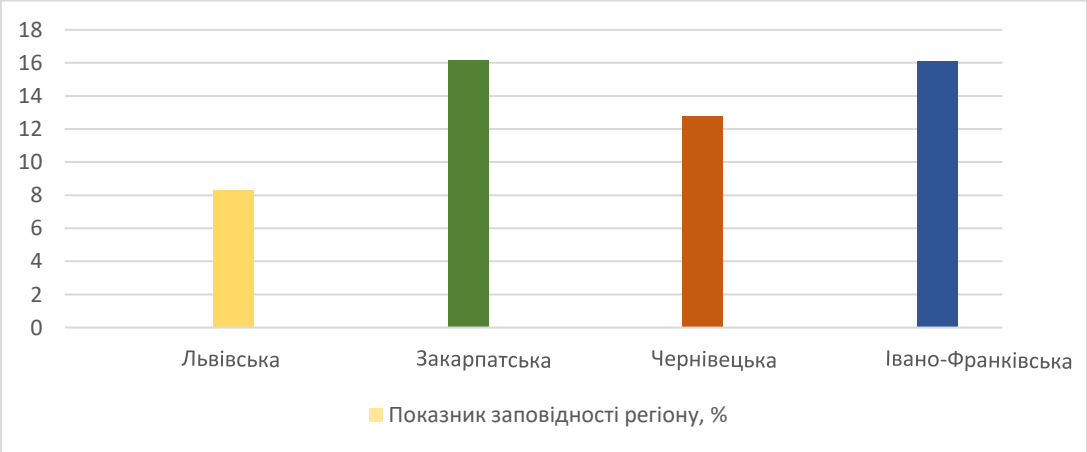


Рис. 7 – Показник заповідності по областях Карпатського регіону
Fig. 7 – Protected area index by regions of the Carpathian region



Рис. 8 – Кількість ПЗФ Карпатського регіону
Fig. 8 – Number of nature reserve fund objects in the Carpathian Region

Аналітичним інструментом, що сприяє глибинному розумінню імперативу впровадження вищезгаданих Протоколів, є визна-чення індексу інсуляризованості Природно-заповідного фонду Карпатського регіону (табл 4). Цей кількісний показник відображає ступінь ізольованості та просторової фрагментації природоохоронних ділянок, що є ключовим фактором, який може лімітувати збереження біорізноманіття та знижувати функціональну ефективність екологічних зв'язків між окремими заповідними зонами.

Згідно з застосованою методикою, значення індексу інсуляризованості (I) варію-ється в діапазоні від 0 до 1. Чим ближче це значення до одиниці, тим вищою є частка ізольованих і нестійких об'єктів у терито-ріальній структурі природно-заповідного фонду регіону. Відповідно, індекс, що дорівнює 1, свідчить про повну неефектив-ність існуючої структури та її неспроможність забезпечити належний рівень збереження природних комплексів. Результати розра-хунків (табл. 4) демонструють, що в усіх областях показники інсуляризованості мають невелику амплітуду коливань, перебуваючи у діапазоні від 0,32 до 0,41. Найвищий результат (0,41) зафіксовано у Чернівецькій області, тоді як найменше значення (0,32) – у Львівській області. Ці показники загалом знаходяться в межах норми. Слід додатково акцентувати увагу на тому, що майже вся південна частина Закарпатської області розташована в межах Карпат, що вимагає підвищеної уваги до охорони заповідної зони на цій території при виконанні умов Карпатської конвенції. Отже, кількісний розрахунок інсуляризованості до-зволяє обґрунтувати пріоритети для експансії екологічної мережі та мінімізації фрагментації природних середовищ існування.

Виконання положень Рамкової конвенції про охорону та сталий розвиток Карпат імперативно вимагає врахування специфічних екологічних ситуацій, які перманентно виникають на території регіону. Карпати є складною гірською екосистемою, у якій природні процеси нерозривно інтегровані з потужним антропогенним впливом.

Аналіз окремих екологічних кейсів дозволяє оцінити фактичну ефективність реалізації положень Конвенції та її протоколів, а також ідентифікувати основні проблеми, що лімітують сталий розвиток регіону. Приклади (табл. 5), візуалізують як досягнутий прогрес у впровадженні, так і суттєві виклики, що постають перед регіоном [33–43].

Аналіз кейсів підтверджує, що екологічні ситуації в Карпатському регіоні є багатовимірними та охоплюють широкий спектр викликів, від інвазії чужорідних видів до конфліктів між господарською діяльністю та природоохоронними інтере-сами. Зокрема, кейси, пов'язані з малими ГЕС в Україні, втратою лісів у Татрах та

Таблиця 4

Індекси інсуляризованості природно-заповідного фонду Карпатського регіону по областям

Table 4

Indices of insularization of the nature reserve fund of the Carpathian region by regions

Область Region	***S*** **Загальна площа заповідних об'єктів в області (тис. га), Total area of protected areas in the region (thousand hectares)**	***S*₁** **Площа відносно нестійких ПЗО (тис. га) Area of relatively unstable protected areas (thousand hectares)**	***Im*** ***Im*** **=*S*₁/ *S***	***N*** **Загальна кількість заповідних об'єктів в області Total number of protected areas in the region**	***N*₁** **Кількість відносно нестійких об'єктів ПЗФ**	***In*** ***In*** **= *N*₁/ *N***	***I*** **Індекс інсуляризованості Insularity index *I* = (*Im* + *In*)/2**
Львівська lviv region	180,3	1,66	0,009	408	258	0,63	0,32
Закарпатська Transcarpathian region	206,4	1,19	0,006	504	377	0,74	0,37
Чернівецька Chernivtsi region	104,3	2,13	0,02	349	277	0,79	0,41
Івано-Франківська Ivano-Frankivsk region	223,9	3,54	0,02	526	352	0,67	0,35

Таблиця 5

Аналіз екологічних кейсів у Карпатському регіоні в контексті виконання положень Рамкової конвенції та її протоколів

Table 5

Analysis of environmental case studies in the Carpathian region in the context of the implementation of the provisions of the framework convention and its protocols

№	**Кейс Case Study**	**Основний аспект та зв'язок з Карпатською Конвенцією Core Aspect and Link to the Carpathian Convention**
1	Конфлікт між бобрами і паводками (Польща, 2024)	Ситуація щодо регулювання популяції бобрів ілюструє конфлікт між захистом інфраструктури та підтримкою екосистем водно-болотних угідь, що безпосередньо стосується виконання Протоколу про біорізноманіття
2	Тренінг КІВБУ (Чехія, 2024)	Проведення міжнародного навчального курсу з відновлення річок та водно-болотних угідь демонструє практичну реалізацію цілей Карпатської водно-болотної ініціативи щодо покращення стану водних екосистем відповідно до Протоколу про біорізноманіття
3	Заборона джипінгу (Україна, 2025)	Заборона використання позашляховиків у заповідних зонах є превентивним заходом для мінімізації рекреаційного навантаження, запобігання ерозії ґрунтів та відповідає вимогам Протоколів про сталий туризм та лісове господарство
4	Втрата лісів у Татрах (Словаччина, 2004)	Масштабні руйнування лісів від буревію підкреслюють вразливість гірських екосистем до екстремальних кліматичних явищ та актуалізують необхідність міжнародного нагляду у контексті Протоколу про стале управління лісами

Продовження таблиці 5

5	Створення заповідника у Фегераші (Румунія, 2023)	Створення найбільшого в Європі заповідника дикої природи демонструє масштабний підхід до охорони фауни та екосистем, що є еталонним прикладом реалізації Протоколу про біорізноманіття
6	Будівництво екодуктів (Чехія, 2024)	Програма зі створення спеціальних переходів (екодуктів) є практичним інструментом подолання фрагментації ландшафтів та забезпечення екологічної зв'язаності для міграції великих ссавців, що відповідає цілям Протоколу про біорізноманіття
7	Конфлікти щодо малих ГЕС (Україна)	Кейс ілюструє критичні еколого-соціальні конфлікти, пов'язані зі зміною гідрологічного режиму річок, загрозою для рідкісних видів риб та недостатньою участю громадськості, що порушує положення Конвенції щодо охорони водних екосистем
8	Інвазія Дуба червоного (Україна)	Офіційне визнання *Quercus rubra* інвазійним видом та його заборона для лісовідновлення (2023 р.) є необхідним заходом реагування на загрозу аборигенному біорізноманіттю, як того вимагає Протокол про біорізноманіття
9	Проєкт «Центральні гори» (Interreg Central Europe, 2024)	Демонстрація транскордонного управління гірськими територіями, що є практичною реалізацією Протоколу про транскордонне співробітництво та регіональне планування
10	Проєкт «Зміцнення мережі ОУР» (AAP Німеччина, 2024)	Успішне завершення проєкту, спрямованого на взаємодію науки, політики та практики в освіті для сталого розвитку. Реалізація Протоколу про підвищення обізнаності, освіту та участь громадськості (Стаття 13)
11	Просування карпатського скотарства до Реєстру ЮНЕСКО НКС (2024–2025)	Реалізація цілей щодо збереження культурної спадщини, підтримки традиційних знань та сталого сільського господарства (Протокол про стале сільське господарство та Протокол про культурну спадщину)
12	Відновлення Експертної групи з великих хижаків та спільна конференція з АК (2024)	Посилення транскордонної співпраці та обміну досвідом у сфері управління популяціями великих хижаків (ведмідь, рись, вовк) відповідно до Протоколу про біорізноманіття
13	Освітній фестиваль «Кроки вперед» (Кошице, Словаччина, листопад 2024)	Сприяння обміну знаннями та впровадженню європейської рамки компетенцій із питань сталості (GreenComp) у сфері освіти для сталого розвитку
14	Швейцарсько-український проект розвитку лісового господарства в Закарпатті «FORZA»	Реалізація моделі сталого та багатофункціонального управління лісами у Карпатах, посилення інституційної спроможності та транскордонного обміну досвідом. Відповідає цілям Протоколу про стале управління лісами

інвазією Дуба червоного, ілюструють вразливість гірських екосистем та необхідність невідкладного реагування. Водночас позитивні приклади, такі як Швейцарсько-український проєкт розвитку лісового господарства в Закарпатті «FORZA», просування карпатського скотарства до ЮНЕСКО НКС, створення природоохоронних інфраструктур (екодуки) та створення заповідника у Фегераші (Румунія), демонструють потенціал міжнародної та міжсекторальної співпраці.

Висновки

Комплексний еколого-правовий аналіз засвідчив, що Рамкова конвенція про охорону та сталий розвиток Карпат є визначальним міжнародним механізмом для успішної інтеграції глобальних природоохоронних зобов'язань у національну політику. Стратегічним результатом останнього періоду є прийняття Карпатської рамкової програми з біорізноманіття (CBF), що уніфікує регіональні екологічні політики та створює основу для подальшого фінансування. Розрахункові індекси інсуляризованості для ПЗФ областей регіону не є критичним, але вказують на необхідність посилення уваги до просторового планування та відновлення екологічної зв'язаності

для запобігання поглибленню фрагментації екосистем.

Для подолання виявлених інституційних та фінансових бар'єрів (за SWOT-аналізом) та повної реалізації потенціалу Конвенції, необхідно концентрувати зусилля на міжсекторальній співпраці, впровадженні науково обґрунтованого просторового планування та використанні досвіду транскордонних проєктів. Аналіз екологічних кейсів продемонстрував, що локальні загрози безпосередньо впливають на виконання Конвенції та вимагають системних заходів реагування, підтверджуючи потенціал співпраці держави, громад і міжнародних партнерів.

Україна здійснює послідовні кроки щодо виконання Рамкової конвенції про охорону та сталий розвиток Карпат, має значний потенціал у розвитку.

Для досягнення повної відповідності її вимогам та реалізації високого природного потенціалу регіону необхідна постійна модернізація правових і екологічних механізмів, посилення міжсекторальної координації та науково обґрунтоване просторове планування.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

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

Декларація про використання ШІ

Автори не використовували технології штучного інтелекту.

Список використаної літератури

1. Carpathian Convention. URL: http://www.carpathianconvention.org/ (дата звернення: 10.11.2025).
2. Vienna Office and Secretariat of the Carpathian Convention. United Nations Environment Programme. URL: https://www.unep.org/regions/europe/our-branches-europe/vienna-office-and-secretariat-carpathian-convention (дата звернення: 11.11.2025).
3. Ramcilovic S. Tracing the Evolution of the Alpine Convention, the Carpathian Convention and the South East European Mountain Initiative. – European Forest Institute Technical Report 28, 2009 URL: https://efi.int/sites/default/files/files/publication-bank/2018/tr_28.pdf (дата звернення: 10.11.2025).
4. Celebrating 21 Years of the Carpathian Convention. Carpathian Convention. URL: http://www.carpathianconvention.org/2024/05/22/celebrating-21-years-of-the-carpathian-convention/ (дата звернення: 11.11.2025).
5. Солодкий В. Д. Виконання вимог стратегії Карпатської конвенції на прикладі Чернівецької області. В. Д. Солодкий, Р. І. Беспалько, І. І. Казімір. Екологія і природокористування. – 2013. – Вип. 17. – С. 11–14. URL: https://archer.chnu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/3104/ecolpr_2013_17_4.pdf?sequence=1&isAllowed=y (дата звернення: 28.11.2025).
6. Policy Framework: Adaptation in Carpathian Mountains. European Environment Agency URL: https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/countries-regions/transnational-regions/carpathian-mountains/policy-framework (дата звернення: 11.11.2025).
7. Гродзинський М. Д. Пізнання ландшафту: місце та простір: Монографія. У 2-х т. К.: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет ", 2005. 503 с.
8. Protocols. Carpathian Convention. URL: http://www.carpathianconvention.org/convention/protocols/ (дата звернення: 09.11.2025).
9. Карпатська конвенція. Державне агентство лісових ресурсів України. URL: https://forest.gov.ua/napryamki-diyalnosti/mizhnarodna-diyalnist/karpatska-konvenciya (дата звернення: 11.11.2025).
10. Україна готується до президентства в Карпатській конвенції. Урядовий портал. URL: https://www.kmu.gov.ua/news/ukraina-hotuietsia-do-prezydentstva-v-karpatskii-konventsii (дата звернення: 11.11.2025).
11. Organizational Structure of the Carpathian Convention [Електронний ресурс]. – URL: http://www.carpathianconvention.org/organization/organizational-structure/ (дата звернення: 11.11.2025).
12. Working Groups. Carpathian Convention. URL: http://www.carpathianconvention.org/organization/organizational-structure/ (дата звернення: 09.11.2025).
13. Carpathian Network of Protected Areas. URL: https://www.carpathianparks.org/ (дата звернення: 09.11.2025).
14. Карпатська водно-болотна ініціатива (CWI). URL: http://www.natureexperts.org/gromadski-inicziatyvy-1/ (дата звернення: 09.11.2025).

15. Карпатська рамкова програма з біорізноманіття (Carpathian Biodiversity Framework, CBF) : [Електронний ресурс] // Convention on Biological Diversity (CBD). URL: https://www.cbd.int/article/carpathian-biodiversity-framework (дата звернення: 29.11.2025).
16. Progress Report for the 15th Carpathian Convention Implementation Committee by the Secretariat based on activities since the 7th Conference of the Parties and the Programme of Work of the Carpathian Convention 2024–2026 : [звіт]. Carpathian Convention Secretariat. [S.l.] : UNEP, 2025. 11 с. (CC/CCIC15). URL:http://www.carpathianconvention.org/wp-content/uploads/2025/01/15th-CCIC-Progress-Report_FINAL.pdf (дата звернення: 29.11.2025).
17. Коваленко Т. О., Заєць О. І. Міжнародно-правова охорона Карпат: український вимір // Науковий вісник УжНУ. Серія «Право». 2022. Вип. 73(1). URL: https://www.researchgate.net/publication/366237229_International_legal_protection_of_the_Carpathians_the_Ukrainian_dimension (дата звернення: 13.11.2025).
18. National Report Ukraine: Implementation of the Carpathian Convention and its Biodiversity Protocol in Ukraine. Carpathian Convention. URL: http://www.carpathianconvention.org/tl_files/carpathiancon/Downloads/Bioregio_storage_backup/donwnloads_resources/Key%20Outputs%20and%20Publication/Ukraine%20report_final.pdf (дата звернення: 13.11.2025).
19. Carpathian Convention signs Tourism Protocol. Convention on Biological Diversity URL: https://www.cbd.int/doc/press/2011/pr-2011-06-28-carpathianconvention-en.pdf (дата звернення: 09.11.2025).
20. Індикатори цілей сталого розвитку. Sustainable Development Goals. URL: https://sdg.ukrstat.gov.ua/uk/goals/ (дата звернення: 10.11.2025).
21. Про статус гірських населених пунктів в Україні : Закон України від 15.02.1995 № 56/95-ВР ; станом на 01.01.2025. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/56/95-%D0%B2%D1%80#Text (дата звернення: 13.11.2025).
22. Про перелік населених пунктів, яким надається статус гірських : постанова Кабінету Міністрів України від 11.08.1995 № 647. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/647-95-%D0%BF#Text (дата звернення: 13.11.2025).
23. Про затвердження Порядку здійснення державного моніторингу довкілля : постанова Кабінету Міністрів України від 30.03.1998 № 391. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/391-98-%D0%BF#Text (дата звернення: 13.11.2025).
24. Про затвердження Методики визначення належності лісових територій до пралісів, квазіпралісів і природних лісів : наказ Міністерства екології України від 18.05.2018 № 161. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0707-18#Text (дата звернення: 13.11.2025).
25. Деякі питання збереження української частини природного об'єкта всесвітньої спадщини ЮНЕСКО «Букові праліси і давні ліси Карпат та інших регіонів Європи» та сталого розвитку прилеглих до нього територій: розпорядження Кабінету Міністрів України від 21.11.2018 № 892-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/892-2018-%D1%80#Text (дата звернення: 13.11.2025).
26. Про розвиток регіону українських Карпат : Указ Президента України від 22.07.2019 № 543/2019. URL: https://www.president.gov.ua/documents/5432019-28753 (дата звернення: 13.11.2025).
27. Про затвердження Державної програми розвитку регіону українських Карпат на 2020–2022 роки : постанова Кабінету Міністрів України від 20.10.2019 № 880. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/880-2019-%D0%BF#Text (дата звернення: 13.11.2025).
28. Про затвердження Переліку інвазійних видів дерев : наказ Міністерства захисту довкілля України від 13.12.2021 № 834. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0641-23#Text (дата звернення: 13.11.2025).
29. Ancient and Primeval Beech Forests of the Carpathians and Other Regions of Europe. UNESCO World Heritage Centre. URL: https://whc.unesco.org/en/list/1133/ (дата звернення: 15.11.2025).
30. Carpathian nature richest of Europe's mountains, new report shows. WWF. URL: https://wwf.panda.org/es/?7195/Carpathian-nature-richest-of-Europes-mountains-new-report-shows (дата звернення: 15.11.2025).
31. Кабаль М. В., Беркела Ю. Ю. Мережа природоохоронних територій в лісах Українських Карпат: сучасний стан та перспективи розвитку.*Природа Карпат.* 2021. № 1(6). URL: https://kbz.in.ua/wp-content/uploads/2024/09/KabBer_2021.pdf (дата звернення: 15.11.2025).
32. Природно-заповідний фонд України: стан на початок 2021 року. URL: https://wownature.in.ua/oberihaymo/pryrodno-zapovidnyy-fond/ (дата звернення: 15.11.2025).
33. У Польщі оголосили війну, але не іншій країні: усе через масштабні повені. Telegraf. URL: https://news.telegraf.com.ua/ukr/mir/2024-09-23/5872707-u-polshchi-ogolosili-viynu-ale-ne-inshiy-kraini-use-cherez-masshtabni-poveni (дата звернення: 10.10.2025).
34. Туск оголосив "війну" бобрам у Польщі. Європейська правда [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.eurointegration.com.ua/news/2024/09/23/7194789/ (дата звернення: 10.10.2025).
35. Bobrze, nie jest dobrze. WWF Polska. URL: https://www.wwf.pl/bobrze-nie-jest-dobrze (дата звернення: 10.10.2025).

36. News & Events. Carpathian Wetland Initiative. URL: https://www.cwi.sk/index.php?page=news (дата звернення: 09.10.2025).
37. «Немає ніякої схеми, як це будуть контролювати»: що відомо про заборону джипінгу в заповідних зонах Карпат. Суспільне Львів. URL: https://suspilne.media/lviv/953311-nemae-niakoi-shemi-ak-ce-budut-kontroluvati-so-vidomo-pro-zaboronu-dzipingu-v-zapovidnih-zonah-karpat/ (дата звернення: 09.10.2025).
38. 20 років тому на Татри обрушилася катастрофа, яка кардинально змінила їх ландшафт. Slovakinfo. URL: https://slovakinfo.sk/ua/novyny-pro-pryrodu/20-rokiv-tomu-na-tatri-obrushilasya-katastrofa-yaka-kardinalno-zminila-%D1%97h-landshaft/ (дата звернення: 09.10.2025).
39. У Румунії створюють найбільший заповідник дикої природи в Європі. LIGA.net URL: https://life.liga.net/all/news/u-rumunii-stvoriuiut-naibilshyi-zapovidnyk-dykoi-pryrody-v-yevropi-ploshcheiu-100-000-hektariv (дата звернення: 09.10.2025).
40. У Чехії будують дорожні мости для ведмедів. LIGA.net. URL: https://czechia-online.cz/u-chehiyi-buduyut-dorozhni-mosty-dlya-vedmediv/ (дата звернення: 09.10.2025).
41. Малі ГЕС: енергетична незалежність чи екологічна катастрофа? Zbruc. URL: https://zbruc.eu/node/1912 (дата звернення: 09.10.2025).
42. Hayda Y., Mohytych V., Bidolakh D. The introduction of red oak (*Quercus rubra* L.) in Ukrainian forests: advantages of productivity versus disadvantages of invasiveness. Folia Forestalia Polonica. – 2022. 64(4). C. 245–252. URL: https://sciendo.com/pdf/10.2478/ffp-2022-0023 (дата звернення: 09.11.2025).
43. Ukraine approves list of alien tree species prohibited in reproduction of forests. Agroberichten Buitenland, 11 May 2023. URL: https://www.agroberichtenbuitenland.nl/actueel/nieuws/2023/05/11/ukraine-approves-list-of-alien-tree-species-prohibited-in-reproduction-of-forests (дата звернення: 15.11.2025).

Стаття надійшла до редакції 28.01.2026 Переглянуто 29.02.2026
Стаття рекомендована до друку 12.03.2026 Опубліковано 30.05.2026

O. O. GOLOLOBOVA[1], PhD (Agriculture),
Associate Professor of the Department of Environmental Monitoring and Protected Area
e-mail: elena.gololobova@karazin.ua ORCID https://orcid.org/0000-0001-5558-2114

M. Y. MOSKVITINA[1],
Master of Science in Ecology
e-mail: moskvitina2021de11@student.karazin.ua ORCID ID: https://orcid.org/0009-0007-9680-954X

[1]*V. N. Karazin Kharkiv National University*,
4, Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

CARPATHIAN CONVENTION: ECOLOGICAL AND LEGAL ANALYSIS OF UKRAINE'S IMPLEMENTATION OF ITS OBLIGATIONS IN THE CONTEXT OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS

Purpose. The objective of the study is to conduct an environmental and legal analysis of Ukraine's implementation of the provisions of the Framework Convention on the Protection and Sustainable Development of the Carpathians, as well as to assess the current environmental status of ecosystems in the Carpathian region of Ukraine in accordance with the criteria and effectiveness of compliance with the requirements set forth in this international treaty.

Methods. System analysis, SWOT analysis, calculation method.

Results. A detailed analysis of the implementation of the Decisions of the 7th Conference of the Parties confirmed the adoption of the Carpathian Framework Programme on Biodiversity, the intensification of cross-border cooperation on large carnivores, the integration of climate risk assessment into forestry, and the promotion of traditional cattle breeding to the UNESCO NCS list. By systematizing commitments, the direct correspondence of the provisions of the Carpathian Convention protocols to the UN Sustainable Development Goals has been confirmed. According to the results of the SWOT analysis, priority efforts should focus on cross-sectoral cooperation, the implementation of scientifically sound spatial planning, and the maximum use of positive experiences from cross-border projects. The calculated indicators of the PZF insularity index range from 0.32 to 0.41, confirming the fragmentation of forest areas and the disruption of ecological links, especially in the Chernivtsi region. The analysis of ecological cases confirmed the impact of local threats on the implementation of the Convention and demonstrated the potential for cooperation between the state, communities, and international partners.

Conclusions. A comprehensive ecological and legal analysis has shown that the Framework Convention on the Protection and Sustainable Development of the Carpathians is a key international mechanism for integrating global commitments (UN SDGs) into national environmental policy. Ukraine is taking consistent steps to implement the Protocols of the Carpathian Convention and has significant potential for full and effective implementation of the Convention by strengthening cross-sectoral cooperation.

KEYWORDS: *Carpathian Convention, Protocols, ecological and legal analysis, sustainable development, insularity, nature reserve fund, invasive species*

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest regarding the publication of this manuscript. Furthermore, the authors have fully adhered to ethical norms, including avoiding plagiarism, data falsification, and duplicate publication.

Authors Contribution: all authors have contributed equally to this work

AI Statement

The work does not use artificial intelligence resources.

References

1. Carpathian Convention. Retrieved from: http://www.carpathianconvention.org/
2. United Nations Environment Programme. Vienna Office and Secretariat of the Carpathian Convention. Retrieved from https://www.unep.org/regions/europe/our-branches-europe/vienna-office-and-secretariat-carpathian-convention
3. Ramcilovic, S. (2009). Tracing the evolution of the Alpine Convention, the Carpathian Convention and the South East European Mountain Initiative (European Forest Institute Technical Report 28). https://efi.int/sites/default/files/files/publication-bank/2018/tr_28.pdf
4. Carpathian Convention. (2024, May 22). Celebrating 21 years of the Carpathian Convention. http://www.carpathianconvention.org/2024/05/22/celebrating-21-years-of-the-carpathian-convention/
5. Solodkyi, V. D., Bespalko, R. I., & Kazimir, I. I. (2013). Implementation of the Carpathian Convention strategy requirements: Case study of Chernivtsi Oblast. Ecology and Nature Management, (17), 11–14. https://archer.chnu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/3104/ecolpr_2013_17_4.pdf?sequence=1&isAllowed=y (in Ukrainian)
6. European Environment Agency. Policy framework: Adaptation in Carpathian Mountains. Retrieved from https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/countries-regions/transnational-regions/carpathian-mountains/policy-framework
7. Hrodzynskyi, M. D. (2005). Understanding landscape: Place and space (Vol. 2). Kyivskyi Universytet. (in Ukrainian)
8. Carpathian Convention. Protocols. Retrieved from http://www.carpathianconvention.org/convention/protocols/
9. State Agency of Forest Resources of Ukraine. Carpathian Convention. Retrieved from https://forest.gov.ua/napryamki-diyalnosti/mizhnarodna-diyalnist/karpatska-konvenciya (in Ukrainian)
10. Cabinet of Ministers of Ukraine. Ukraine prepares for the presidency in the Carpathian Convention. Retrieved from https://www.kmu.gov.ua/news/ukraina-hotuietsia-do-prezydentstva-v-karpatskii-konventsii (in Ukrainian)
11. Carpathian Convention. Organizational structure of the Carpathian Convention. Retrieved from http://www.carpathianconvention.org/organization/organizational-structure/
12. Carpathian Convention. Working groups. Retrieved from http://www.carpathianconvention.org/organization/organizational-structure/
13. Carpathian Network of Protected Areas. Retrieved from https://www.carpathianparks.org/
14. Carpathian Wetland Initiative. Carpathian Wetland Initiative (CWI). Retrieved from http://www.natureexperts.org/gromadski-inicziatyvy-1/
15. Convention on Biological Diversity. Carpathian Biodiversity Framework (CBF). Retrieved from https://www.cbd.int/article/carpathian-biodiversity-framework
16. Carpathian Convention Secretariat. (2025). Progress report for the 15th Carpathian Convention Implementation Committee by the Secretariat based on activities since the 7th Conference of the Parties and the Programme of Work of the Carpathian Convention 2024–2026 (CC/CCIC15). UNEP. http://www.carpathianconvention.org/wp-content/uploads/2025/01/15th-CCIC-Progress-Report_FINAL.pdf
17. Kovalenko, T. O., & Zaiets, O. I. (2022). International legal protection of the Carpathians: The Ukrainian dimension. Scientific Bulletin of Uzhhorod National University. Series "Law", 73(1). https://www.researchgate.net/publication/366237229_International_legal_protection_of_the_Carpathians_the_Ukrainian_dimension (in Ukrainian)
18. Carpathian Convention. National report Ukraine: Implementation of the Carpathian Convention and its Biodiversity Protocol in Ukraine. Retrieved from http://www.carpathianconvention.org/tl_files/carpathiancon/Downloads/Bioregio_storage_backup/donwnloads_resources/Key%20Outputs%20and%20Publication/Ukraine%20report_final.pdf
19. Convention on Biological Diversity. (2011, June 28). Carpathian Convention signs Tourism Protocol [Press release]. https://www.cbd.int/doc/press/2011/pr-2011-06-28-carpathianconvention-en.pdf
20. State Statistics Service of Ukraine. Sustainable Development Goals indicators. Retrieved from https://sdg.ukrstat.gov.ua/uk/goals/ (in Ukrainian)

21. Verkhovna Rada of Ukraine. (1995, February 15). On the status of mountain settlements in Ukraine (Law No. 56/95-VR, as amended January 1, 2025). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/56/95-%D0%B2%D1%80#Text (in Ukrainian)
22. Cabinet of Ministers of Ukraine. (1995, August 11). On the list of settlements granted mountain status (Resolution No. 647). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/647-95-%D0%BF#Text
23. Cabinet of Ministers of Ukraine. (1998, March 30). On approval of the Procedure for state environmental monitoring (Resolution No. 391). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/391-98-%D0%BF#Text (in Ukrainian)
24. Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine. (2018, May 18). On approval of the Methodology for identifying primeval forests, quasi-primeval forests and natural forests (Order No. 161). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0707-18#Text (in Ukrainian)
25. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2018, November 21). Certain issues of preservation of the Ukrainian part of the UNESCO World Heritage site "Ancient and Primeval Beech Forests of the Carpathians and Other Regions of Europe" and sustainable development of adjacent territories (Order No. 892-r). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/892-2018-%D1%80#Text (in Ukrainian)
26. President of Ukraine. (2019, July 22). On the development of the Ukrainian Carpathians region (Decree No. 543/2019). https://www.president.gov.ua/documents/5432019-28753 (in Ukrainian)
27. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2019, October 20). On approval of the State Program for the Development of the Ukrainian Carpathians Region for 2020–2022 (Resolution No. 880). https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/880-2019-%D0%BF#Text (in Ukrainian)
28. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. (2021, December 13). On approval of the List of invasive tree species (Order No. 834). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0641-23#Text (in Ukrainian)
29. UNESCO World Heritage Centre. (n.d.). Ancient and Primeval Beech Forests of the Carpathians and Other Regions of Europe. Retrieved from https://whc.unesco.org/en/list/1133/
30. WWF. Carpathian nature richest of Europe's mountains, new report shows. Retrieved from https://wwf.panda.org/es/?7195/Carpathian-nature-richest-of-Europes-mountains-new-report-shows
31. Kabal, M. V., & Berkela, Yu. Yu. (2021). Network of protected areas in the forests of the Ukrainian Carpathians: Current state and development prospects. Nature of the Carpathians, (1)6. https://kbz.in.ua/wp-content/uploads/2024/09/KabBer_2021.pdf (in Ukrainian)
32. We Protect Nature. Nature reserve fund of Ukraine: Status as of the beginning of 2021. Retrieved from https://wownature.in.ua/oberihaymo/pryrodno-zapovidnyy-fond/
33. Telegraf. (2024, September 23). Poland declares "war" – but not on another country: It's all because of massive floods. https://news.telegraf.com.ua/ukr/mir/2024-09-23/5872707-u-polshchi-ogolosili-viynu-ale-ne-inshiy-krainiuse-cherez-masshtabni-poveni
34. European Pravda. (2024, September 23). Tusk declares "war" on beavers in Poland. https://www.eurointegration.com.ua/news/2024/09/23/7194789/
35. WWF Polska. Beaver, things are not looking good. Retrieved from https://www.wwf.pl/bobrze-nie-jest-dobrze
36. Carpathian Wetland Initiative. News & events. Retrieved from https://www.cwi.sk/index.php?page=news
37. Suspilne Lviv. "There is no scheme how it will be controlled": What is known about the ban on jeeping in the protected areas of the Carpathians. Retrieved from https://suspilne.media/lviv/953311-nemae-niakoi-shemi-ak-ce-budut-kontroluvati-so-vidomo-pro-zaboronu-dzipingu-v-zapovidnih-zonah-karpat/ (in Ukrainian)
38. Slovakinfo. 20 years ago, a disaster hit the Tatras that radically changed their landscape. Retrieved from https://slovakinfo.sk/ua/novyny-pro-pryrodu/20-rokiv-tomu-na-tatri-obrushilasya-katastrofa-yaka-kardinalno-zminila-%D1%97h-landshaft/
39. LIGA.net. Romania is creating the largest wilderness reserve in Europe. Retrieved from https://life.liga.net/all/news/u-rumunii-stvoriuiut-naibilshyi-zapovidnyk-dykoi-pryrody-v-yevropi-ploshcheiu-100-000-hektariv
40. LIGA.net. Czechia builds road bridges for bears. Retrieved from https://czechia-online.cz/u-chehiyi-buduyut-dorozhni-mosty-dlya-vedmediv/
41. Zbruc. Small hydropower plants: Energy independence or ecological disaster? Retrieved from https://zbruc.eu/node/1912
42. Hayda, Y., Mohytych, V., & Bidolakh, D. (2022). The introduction of red oak (*Quercus rubra* L.) in Ukrainian forests: Advantages of productivity versus disadvantages of invasiveness. Folia Forestalia Polonica, 64(4), 245–252. https://doi.org/10.2478/ffp-2022-0023
43. Agroberichten Buitenland. (2023). Ukraine approves list of alien tree species prohibited in reproduction of forests. https://www.agroberichtenbuitenland.nl/actueel/nieuws/2023/05/11/ukraine-approves-list-of-alien-tree-species-prohibited-in-reproduction-of-forests

The article was received by the editors 28.01.2026 The article was revised 29.02.2026
The article is recommended for printing 12.03.2026 This article published 30.05.2026

https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-02
УДК(UDC): 551.524.3:613.1(477.54-25)

Н. В. МАКСИМЕНКО[1], д-р географ. наук, проф.,
завідувачка кафедри екологічного моніторингу та заповідної справи
e-mail: maksymenko@karazin.ua ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-7921-9990
Д. С. ДОЛЯ[1],
здобувач освіти першого (бакалаврського) рівня,
e-mail: dmytro.dolia@student.karazin.ua ORCID ID: https://orcid.org/0009-0002-0283-4116

[1]*Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна*
майдан Свободи, 4, м. Харків, Україна 61022

БАГАТОРІЧНА ДИНАМІКА ПАТОГЕННОСТІ ПОГОДИ ТА БІОКЛІМАТИЧНОГО КОМФОРТУ У МІСТІ ХАРКІВ

Мета. Визначення основних тенденцій багаторічної зміни показників патогенності погоди у м. Харків на основі адаптованої авторами методики визначення індексів патогенності погоди.

Методи. Оцінювання проведено на основі індексу патогенності погоди (J), який враховує комплексний вплив основних метеорологічних параметрів на організм людини.

Результати. Досліджено багаторічну динаміку патогенності погоди та біокліматичного комфорту у місті Харків. Проаналізовано сезонну та міжрічну мінливість показників упродовж 2017–2025 рр. Визначено особливості формування сприятливих і несприятливих біокліматичних умов у різні пори року. На основі аналізу основних метеорологічних показників (температура і вологість повітря, швидкість вітру, атмосферний тиск та їх міждобові коливання) встановлено, що найвищі значення патогенності погоди характерні для холодного періоду року. У цей час спостерігаються підвищені значення індексу J (>20), що зумовлено поєднанням низьких температур, значної швидкості вітру та різких міждобових коливань метеорологічних показників. У літній сезон загалом переважають найбільш комфортні біокліматичні умови (J < 9). Середні значення індексу J у цей період є найнижчими за рік, що пов'язано з відносною стабільністю атмосферних процесів і меншою контрастністю метеорологічних параметрів. Весняний і осінній періоди характеризується значною нестійкістю погодних умов і підвищеною варіабельністю індексу патогенності. Міжрічний аналіз продемонстрував тенденцію до підвищення мінливості значень індексу патогенності упродовж досліджуваного періоду.

Висновки. Підтверджено доцільність використання індексу патогенності погоди як інтегрального показника оцінки біокліматичного стану урбанізованих територій. Практичне значення дослідження полягає у можливості застосування результатів для медико-метеорологічного прогнозування, оцінки рекреаційного потенціалу території, а також розроблення заходів адаптації населення до несприятливих погодних умов в умовах кліматичних змін.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *кліматичні зміни, патогенність погоди, біокліматичний комфорт, індекс патогенності, медична метеорологія, міський клімат*

Як цитувати: Максименко Н. В., Доля Д. С. Багаторічна динаміка патогенності погоди та біокліматичного комфорту у місті Харків. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2026. Вип. 34. С. 31-41. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-02

In cites: Maksymenko N. V., & Dolia, D. S. (2026). Long-term dynamics of weather pathogenicity and bioclimatic comfort in the city of Kharkiv. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology,* (34), 31-41. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-02 (in Ukrainian)

Вступ

Однією із глобальних цілей сталого розвитку є 13. Боротьба зі зміною клімату, що спонукає вчених проводити глибокі дослідження динаміки кліматичних показників та чинників, що її спричиняє. В цих дослідженнях значне місце посідають роботи, що вивча-

© Максименко Н. В., Доля Д. С., 2026

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0

ють зв'язок змін клімату і захворюваністю населення. Метеочутливість, метеозалежність і метеопрофілактика стали невід'ємною складовою медико-екологічних досліджень. Наприклад, класичне дослідження зв'язку між погодними умовами та больовими симптомами у пацієнтів з хронічним болем представлене в роботі [1], яка висвітлює феномен метеочутливості (weather sensitivity), який є важливим проявом патогенної дії погоди. Регіональні дослідження, присвячені оцінці комфортності погодних умов містяться в роботах [2, 3, 4, 5], але з різних ракурсів. Якщо робота [2] простежує біокліматичні характеристики Київського регіону та тенденції їх змін в умовах кліматичного потепління та оцінює комплексний вплив метеорологічних чинників на людину, то роботи [3-5] оцінюють комфортність погоди за загальним індексом патогенності погоди (ІПП).

Систематичний огляд теплового сприйняття та стратегій адаптації людини в різних кліматичних зонах світу [6] розглядає суб'єктивні аспекти впливу погоди, що доповнює концепцію патогенності погоди, але фокусується переважно на термічному сприйнятті, а не на інтегральному кількісному індексі типу ІПП. У той же час, для об'єктивної оцінки ролі того чи іншого кліматичного чинника в створенні комфортного для людини середовища існування все частіше науковці використовують певні індекси.

Класична робота [7], присвячена Physiologically Equivalent Temperature (PET) – універсальному термічному індексу, який інтегрує вплив температури, вологості, вітру та радіації на тепловий баланс організму людини.

Стаття [8] представляє Meteorological Contrast Index – індекс метеорологічних контрастів (різких змін погодних умов). Цей індекс акцентує увагу на динамічних змінах метеофакторів, які є однією з ключових складових патогенності погоди.

Детальний огляд історії, методології та обмежень індексу Wet-Bulb Globe Temperature (WBGT) представлено у роботі [9]. WBGT є практичним інтегральним індексом теплового навантаження, що зосереджується особливо на оцінці впливу на працездатність і безпеку людини, хоча й з меншим акцентом на атмосферний тиск та електричний стан атмосфери.

Аналіз теплових ризиків на Олімпійських іграх у Парижі-2024 та політик міжнародних федерацій наведено у [10]. Джерело демонструє сучасне практичне застосування біокліматичних індексів (зокрема WBGT) для оцінки ризиків для здоров'я.

Окрема група робіт використовує Універсальний кліматичний термальний індекс (UTCI), що враховує теплопередачу всередині тіла та між його окремими частинами, а також між поверхнею тіла та навколишнім середовищем. Така модель теплообміну складається з двох підсистем: пасивної та активної [11, 12]. Пасивна підсистема включає фізичні елементи механізму теплопереносу всередині тіла та на його поверхні, тоді як активна підсистема включає фізіологічний механізм терморегуляції. UTCI – це інструмент, який полегшує такі порівняння та оцінки незалежно від кліматичної зони та пори року, і є незалежним від таких особистих ознак, як стать, вік, фізична активність і одяг [13]. Системний огляд застосування Universal Thermal Climate Index (UTCI) як медичного прогностичного інструменту в умовах зміни клімату [14] показав, що UTCI є одним з найближчих сучасних міжнародних аналогів ІПП, оскільки є інтегральним індексом, що оцінює комплексний вплив метеорологічних факторів на фізіологічний стан людини. UTCI використовується, наприклад, у дослідженнях із оцінки біокліматичного потенціалу для туризму та відпочинку [15], оцінці міського біоклімату [16] та багатьох інших сферах.

Таким чином, глобальні зміни клімату є важливою проблемою сталого розвитку. Саме залежність від клімату здоров'я і самопочуття людини, його умов проживання, а подекуди і безпеки людини спонукають наукову спільноту до пошуку об'єктивних параметрів для прогнозу змін. *Метою дослідження* є: визначення основних тенденцій багаторічної зміни показників патогенності погоди у м. Харків на основі адаптованої авторами методики визначення індексів патогенності погоди.

Матеріали і методи

Натепер, як показано вище, в Світі сформувалось декілька біокліматичних індексів, які можуть слугувати тим математичним інструментом, що може дати кількісну, а як наслідок – і якісну оцінку комфортності довкілля для людини.

В дослідженнях українських вчених зустрічаються такі кключові показники [17]:

- Індекс суворості погоди Бодмана (*S)*
- Вітрово-холодовий індекс Сайпла і Пассела (K_o) – використовуються переважно для оцінки холодового стресу в зимовий період.
- Індекс патогенності В. Бокші (I_{sum}) – комплексний показник, що враховує динаміку температури, вологості, швидкості вітру, хмарності та міждобову мінливість тиску [18].

На думку [17] останній найповніше відповідає потребам науковців у оцінці патогенності погоди, що доведено в просторово-часовому аналізі розподілу біокліматичного індексу В. Бокші на території України (26 міст, 2018–2023 рр.) та розробці автоматизованого застосунку для його розрахунку. Це джерело є прямим прикладом використання індексу патогенності погоди (ІПП) в українській науці, що ідеально відповідає визначенню ІПП як інтегральної характеристики несприятливого впливу комплексу метеофакторів.

Авторами для оцінки біометеорологічного впливу погодних умов на організм людини застосовано індекс патогенності погоди (J), розрахований за методикою що міститься у працях В. Бокші та адаптованою авторами до потреб цього дослідження.

Індекс патогенності погоди визначався як інтегральний показник, що враховує сумарний вплив основних метеорологічних факторів і їх міждобових змін:

$$J = a \mid T - T_{opt} \mid + b \mid f - f_{opt} \mid + cv + d \mid p - p_{opt} \mid + e \mid \Delta T \mid + k \mid \Delta p \mid \quad (1)$$

Де: T— середньодобова температура повітря, °C;

f— відносна вологість повітря, %;

v— швидкість вітру, м/с;

p— атмосферний тиск, гПа;

ΔT— міждобова зміна температури повітря, °C;

Δp— міждобова зміна атмосферного тиску, гПа.

Як оптимальні значення метеорологічних параметрів прийнято: температура повітря $T_{opt} = 18°C$, відносна вологість $f_{opt} = 60\%$, атмосферний тиск $p_{opt} = 1013$гПа.

Температурна складова

$$J_t = a \cdot \mid T - T_{opt} \mid \quad (2)$$

Де: T— середньодобова температура;

T_{opt}— оптимальна (зазвичай +18°C);

$a = 0.2$–0.3.

Вологість повітря

$$J_f = b \cdot \mid f - f_{opt} \mid \quad (3)$$

Де: f – відносна вологість (%);

$f_{opt} = 60\%$; $b \approx 0.05$–0.06

Швидкість вітру

$$J_v = c \cdot v \quad (4)$$

Де: v – швидкість вітру (м/с);

$c \approx 0.5$–0.7

Атмосферний тиск

$$J_p = d \cdot \mid p - p_{opt} \mid \quad (5)$$

Де: p – тиск (гПа або мм рт. ст.);

$p_{opt} = 1013$ гПа(або 760 мм);

$d \approx 0.02$–0.03

Міждобова зміна температури

$$J_{\Delta t} = e \cdot \mid \Delta T \mid \quad (6)$$

Де: $\Delta T = T_{\text{сьогодні}} - T_{\text{вчора}}$; $e \approx 0.5$–1.0

Міждобова зміна тиску

$$J_{\Delta p} = k \cdot \mid \Delta p \mid \quad (7)$$

Де: $\Delta p = p_{\text{сьогодні}} - p_{\text{вчора}}$; $k \approx 0.03$–0.05

Коефіцієнти вагомості прийнято відповідно до адаптованих варіантів методики: $a = 0{,}2$–$0{,}3$, $b = 0{,}05$–$0{,}06$, $c = 0{,}5$–$0{,}7$, $d = 0{,}02$–$0{,}03$, $e = 0{,}5$–$1{,}0$, $k = 0{,}03$–$0{,}05$.

Отримані значення індексу *J* інтерпретувалися за наступною шкалою:

- $0 < J < 9$ – оптимальні погодні умови;
- $9 \leq J < 25$ – подразнювальні погодні умови;
- $J \geq 25$ – гострі погодні умови.

Додатково для оцінки біокліматичного навантаження використовувався показник подразнювальної дії погоди (R), який аналізувався за аналогічною шкалою градації.

Статистична обробка результатів виконувалася з використанням стандартних методів описової статистики. Візуалізація даних здійснювалася шляхом побудови залежностей у програмі Microsoft Excel та теплової карти із застосуванням кольорової кодифікації рівнів біометеорологічного впливу з використанням алгоритмів NoteBookLM

У роботі використано результати щоденних метеорологічних спостережень за основними кліматичними показниками (температура повітря, відносна вологість, швидкість вітру, атмосферний тиск) за період з 2017 по 2025 рік [19, 20, 21].

Результати та обговорення

У контексті сучасних глобальних кліматичних трансформацій особливої актуальності набуває кількісна оцінка впливу метеорологічних чинників на функціональний стан людського організму. Використання комплексних біокліматичних показників, зокрема індексу патогенності погоди (J-index), дозволяє інтегрально оцінити рівень подразнювальної дії атмосфери та ідентифікувати періоди найбільшого біотропного ризику для населення. Представлений аналіз базується на результатах моніторингу метео-рологічних умов у м. Харків за період 2017–2025 рр., що дає змогу об'єктивно оцінити як сезонну циклічність, так і характер міжрічної мінливості кліматичного комфорту території.

Аналіз сезонної та міжрічної динаміки індексу патогенності погоди (рис.1) дозволив встановити чітку сезонну залежність патогенного впливу погоди на організм людини. Графік динаміки J-індексу має виражену U-подібну форму (форму «чаші»), що характеризується екстремальним навантаженням у зимовий період та мінімізацією значень у літні місяці.

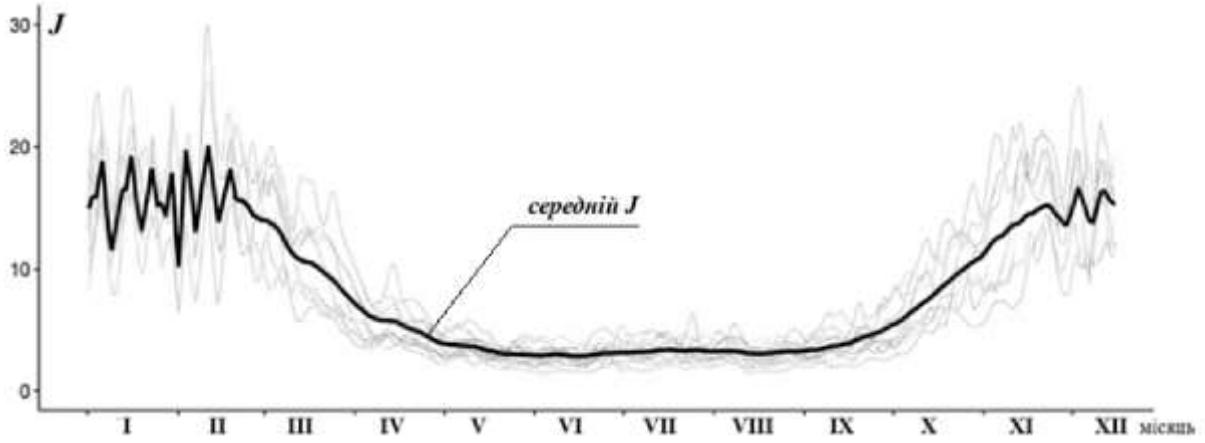


Рис. 1 – Багаторічна динаміка щоденних індексів патогенності погоди м. Харків за період 2017-2025 роки

Fig. 1 – Long-term dynamics of daily weather pathogenicity indices in Kharkiv for the period 2017-2025

Зима історично є найскладнішим періодом для біокліматичного комфорту, проте патогенність розвивається поступово. Класичний зимовий стрес у Харкові є кумулятивним. Організм має час на адаптацію до поступового зниження температур і зміни тиску. Зимовий період характеризується екстремальністю та нестабільністю.

У період з грудня по лютий спостерігаються зимові максимуми патогенності, де значення індексу періодично досягають відмітки 25 одиниць, що класифікується як «гостра» або «дуже висока» патогенність. Основними факторами формування таких піків є:

– термічний стрес, зумовлений поєднанням низьких температур та вітрового навантаження;
– висока вологість та часті опади у вигляді мокрого снігу;
– активна циклонічна діяльність, що супроводжується різкими коливаннями атмосферного тиску та зміною вмісту кисню в повітрі.

Зазвичай високі індекси (>15) тримаються серіями по 3-5 днів, що відповідає проходженню масштабних атмосферних фронтів або стабільним антициклонам.

Аналіз міжрічної мінливості свідчить, що зима є найбільш нестабільним сезоном: у різні роки показник варіював від помірних 9 одиниць до екстремальних 30, що може бути наслідком дестабілізації клімату та черг-ування аномально теплих зим із арктичними вторгненнями.

Літня стабілізація має у своїй суті оздоровчий потенціал, оскільки на противагу зимовому періоду, з травня до вересня фіксується літня сталість клімату. Показники патогенності опускаються нижче 9 одиниць, що свідчить про переважання оптимальних умов, які майже не потребують адаптаційних зусиль від організму. Важливою особливістю літа є його висока стабільність з року в рік: світлі криві щорічних спостережень зливаються у вузьку смугу, підтверджуючи надійність цього періоду для кліматотерапії та планового оздоровлення.

Перехідні сезони містять у собі процеси що здатні спричиняти медико-метеорологічні ризики. Встановлено суттєву відмінність у динаміці перехідних сезонів:

– весна характеризується високим розкидом значень (особливо у березні), що відображає різний характер «приходу» весни у досліджуваний період.

– осінь демонструє більш синхронне та різке зростання патогенності. Стислі тер-міни переходу (жовтень–листопад) змушують організм швидко адаптуватися зростання навантаження. Індекс патогенності зростає у 2 рази і вся погода характеризується як подразнювальна, що підвищує ризик виникнення сезонних депресій та зниження імунітету.

Виявлені періоди з J-індексом понад 25 одиниць є критичними для пацієнтів із серцево-судинними захворюваннями (гіпертонія, ішемічна хвороба серця) та патологіями дихальних шляхів. Отримані дані дозволяють прогнозувати сплески звернень по медичну допомогу та ефективно планувати лікувально-профілактичні заходи в регіоні

Перехідні сезони характеризуються медіанною патогенністю, різкими міждобовими перепадами (від 10 до 20 за 48 годин). Такий період є критичним для кардіологічних пацієнтів.



Рис.2 – Зони максимальної турбулентності погод

Fig. 2 – Zones of maximum weather turbulence

Пряме порівняння двох ключових сезонів доводить гіпотезу про полярну патогенність кліматичних періодів в Україні. Зима (рис. 2) має максимальну патогенність, що проявляється в розрахованих найвищих середніх показниках індексу ***J*** та всіх абсолютних максимумах, зосереджених саме в цей період. Крім того, саме взимку спостерігається найширша амплітуда коливань індексу, що свідчить про високу непередбачуваність погоди.

У той же час, літо можна умовно назвати періодом біологічної рекреації, де зосереджені найнижчі і найстабільніші показники індексу ***J***. Що створює найсприятливіший фон для відновлення організму, повністю виключаючи екстремальні патогенні стреси.

Аналіз представленого рисунка (теплової карти) у поєднанні з даними розрахункової таблиці індексів патогенності та статистики метеорологічних елементів дозволяє виявити чітку залежність між станом атмосфери та біокліматичним комфортом.

Згідно з тепловою картою (рис. 3), найбільш інтенсивні «гарячі» зони (J > 30–50) припадають на зимові місяці та окремі дати 2025 року. Аналіз відповідних метеорологічних даних пояснює ці сплески наступними чинниками:

– низькі температури у поєднанні з вітром: Найвищі показники J-індексу спостерігаються при від'ємних температурах. Наприклад, 17.01.2021 (J=18,48) характеризувалося температурою -7,5 °C та значною вологістю. Екстремальний показник 01.12.2025 (J=68,25) супроводжувався морозом -5,2 °C та високою вологістю 89,4%.

– висока відносна вологість: У зимові місяці вологість часто перевищує 85–90%, що посилює охолоджувальну дію повітря. Наприклад, 26.12.2025 (J=30,03) при температурі -2,6 °C вологість становила 87,4%.

– аномальні погодні явища: Сплеск патогенності 01.04.2025 (J=62,15) є нетиповим для весни. Хоча середня температура була 14,8 °C, висока патогенність у такі дні зазвичай зумовлена різкими коливаннями атмосферного тиску (в цей день він становив 763,0 мм рт. ст.) або іншими динамічними чинниками, що відображені у формулі розрахунку.

«Холодні» синьо-зелені зони на рисунку (J < 10) відповідають періодам максимального комфорту, що забезпечується наступними параметрами:

– оптимальний термічний режим: показники J-індексу мінімальні при температурах +18...+25 °C. Наприклад, у липні 2020 року, який на карті виглядає найбільш комфортним, температури стабільно трималися в межах 17–24 °C (наприклад, 03.07.2020 — J=7,07 при T=23,0 °C).

– помірна вологість та низька швидкість вітру: У літні дні з низькою патогенністю вологість зазвичай не перевищує 50–65%, а швидкість вітру є мінімальною. Наприклад, 16.07.2017 (J=3,42) характеризувалося температурою 17,2 °C та вологістю 74,8%.

– стабільність атмосфери: літні місяці (червень–серпень) демонструють найменшу міжрічну мінливість на тепловій карті, оскільки метеорологічні елементи в цей час найбільш збалансовані для організму людини.

Таким чином, можна констатувати, що головним патогенним чинником для Харкова є зимовий дискомфорт, викликаний синергією морозу, високої вологості (часто > 80%) та вітрового навантаження. Зона комфорту (травень–вересень) сформована стабільними температурами вище +15 °C та помірною вологістю, що мінімізує навантаження на адаптаційні системи.

Аномалії 2025 року на тепловій карті вказують на зростання частоти екстремальних погодних явищ, коли навіть при додатних температурах (як у квітні) патогенність може сягати критичних значень через нестабільність тиску чи вологості.

Аналіз міжрічного розподілу патогенності погоди в Харкові за період з 2017 до 2025 року, проведений на основі матриці індексу ***J*** дозволяє виявити чіткі закономірності, що мають критичне значення для кліматотерапії та рекреації (рис.3). Виявлена загальна сезонна закономірність, що відслідковується на графіку.

Максимуми (червоно-чорна гама) припадають на зимові місяці (грудень, січень, лютий). У цей період значення індексу стабільно перевищують 30–40 одиниць, а в окремі роки сягають екстремальних значень понад 50 одиниць. Це свідчить про високе подразнювальне навантаження на організм людини через низькі температури, вітер та вологість.

Мінімуми (синьо-зелена гама) спостерігаються у літній період (червень–серпень). Значення індексу тут коливаються в межах 0–10 одиниць, що відповідає зоні максимального біокліматичного комфорту.

Аналіз окремих років дозволяє виявити тенденції до дестабілізації клімату, а саме: 2020 рік виділяється як найбільш «м'який» за весь період спостережень. Весняні та літні місяці забарвлені переважно у синій колір, що вказує на тривалий період комфортних погодних умов. У той же час, 2025 рік є критично аномальним. На тепловій карті він позначений найбільш інтенсивними кольорами. Особливу увагу привертають січневий та грудневий піки, коли значення стабільно тримаються у темно-фіолетовій зоні (понад 50 одиниць). Також виявлена квітнева аномалія, коли на відміну від інших років, зафіксовано різкий сплеск патогенності (темна пляма на фоні жовто-зелених кольорів інших років), що може бути пов'язано з екстремальними погодними явищами.

Стосовно перехідних сезонів (березень та листопад) можна зазначити, що вони виступають зонами помірної патогенності -10–25 одиниць, що класифікується як подразнюваль-

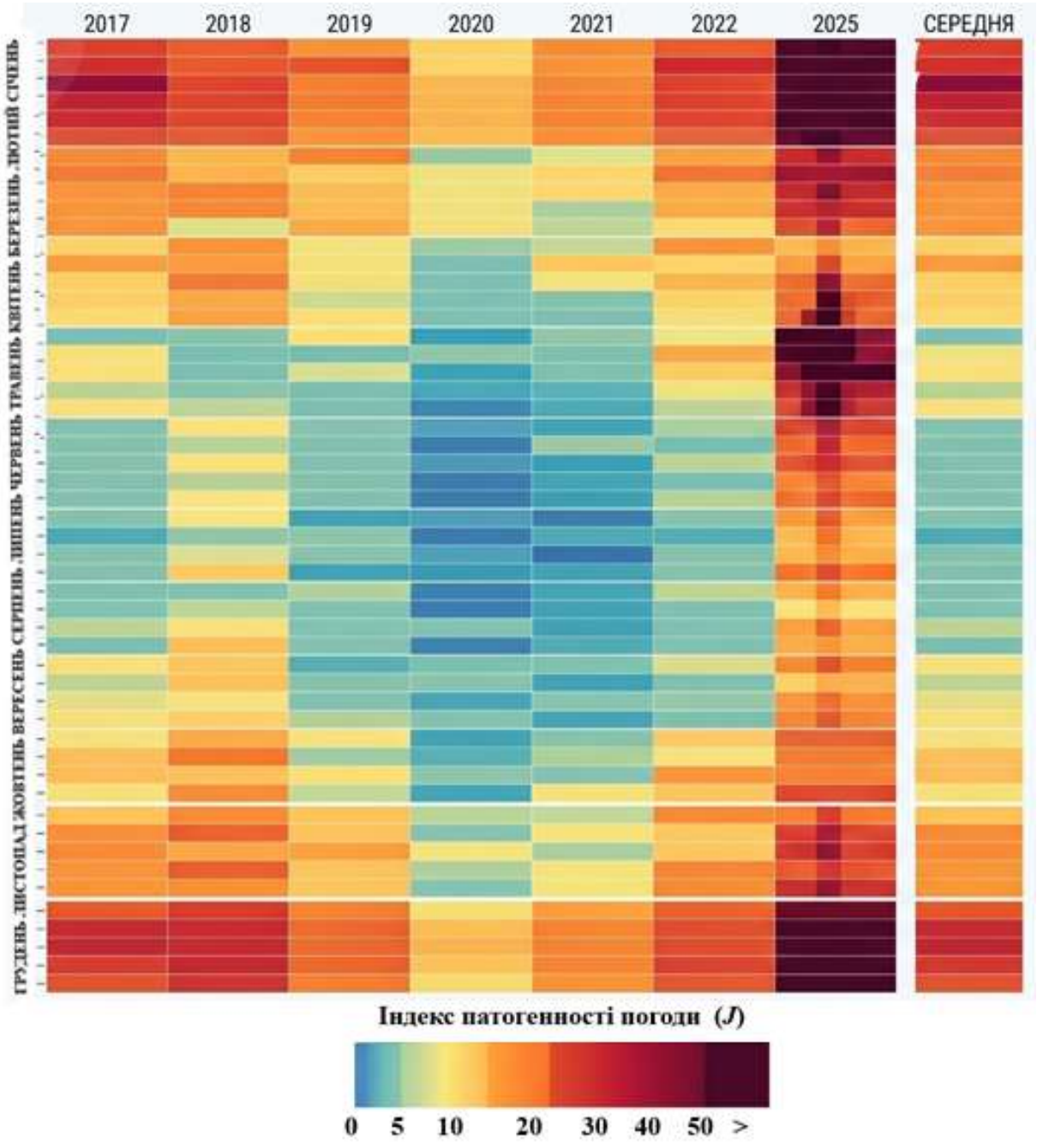


Рис. 3 – Матриця патогенності погоди у м. Харків (2017-2025 р.р.)

Fig. 3 – Weather pathogenicity matrix in Kharkiv (2017-2025)

на погода. В цей період у деякі роки спостерігається тенденція до «стиснення» подразнювального періоду (наприклад, 2022 та 2025), коли перехід від зимового дискомфорту до літнього спокою відбувається більш різко, що створює додаткове навантаження на адаптаційні системи людини.

Окремо на теплову карту розміщено стовпчик «Середня», що розрахований як усереднені значення за період спостережень. Він підтверджує, що найбільш стабільним та безпечним для здоров'я є період з травня по вересень, тоді як зимовий період вимагає посиленої уваги до метеозалежних верств населення через високу імовірність гострої патогенної дії атмосфери. Ця теплова карта беззаперечно доводить, що так звана погана погода – це не випадкові дні, а системні сезонні блоки.

Проведене дослідження є підгрунтям для оцінки можливості розвитку кліматичного

туризму та бальнеології, оскільки є категорії метеозалежних людей, для яких такі кліматичні умови є комфортними з медичної точки зору, але не протягом всього року.

Розглянемо особливості регіону для розвитку бальнеологічних курортів. З точки зору комфортності погоди, можна виділити "золоте вікно" - травень, червень, липень та серпень. Цей період є ідеальними для аеротерапії та геліотерапії. Низька вологість (в межах 50-60%) та мінімальна патогенність дозволяють проводити тривалі екскурсії та активний відпочинок. Серпень виділяється як місяць із найнижчою середньою вологістю (до 43.3% у 2018 році), що робить його найкращим часом для людей із захворюваннями дихальних шляхів.

При комфортних літніх погодах курорти матимуть сезонну спеціалізацію, оскільки в зимовий період (листопад-лютий) погодні умови є "гостро патогенними". В цей період розвиток бальнеології в Харкові має орієнтуватися на закриті приміщення (криті басейни, SPA-центри). Відкриті процедури в цей час протипоказані через високий ризик метеопатичних реакцій.

У той же час, розвиток інфраструктури, орієнтованої виключно на відкрите повітря, взимку є економічно недоцільним через вкрай несприятливий кліматичний фон (J > 25).

Висновки

Встановлено, що патогенний вплив погоди на стан здоров'я населення м. Харків не є хаотичним – він жорстко підпорядкований сезонному ритму. Агрегація 17 528 щоденних вимірювань у середньомісячні показники викристалізувала таку тенденцію:

- зима є об'єктивно найнебезпечнішим періодом для метеозалежних людей, що зумовлено високою варіативністю індексу ***J*** та регулярною появою екстремальних значень (>20);

- літні місяці підтверджені дослідженням як найсприятливіший час , оскільки спостерігається повна відсутність днів з гострою патогенністю, а днів з подразнювальною дією (>9) критично мало. Тобто низькі середні значення ***J*** роблять цей сезон оптимальним для відновлення здоров’я та кліматичного туризму.

Чітка U-подібна крива сезонності дозволяє інтегрувати індекс ***J*** у системи медичного планування та урбаністичного управління, готуючи інфраструктуру охорони здоров’я до неминучих зимових піків. У той же час, м. Харків має високий потенціал для літо-орієнтованих бальнеологічних курортів та кліматичного туризму.

Конфлікт інтересів

Автори засвідчують, що, незважаючи на те, що один із авторів статті є членом редакційної колегії цього журналу, процес рецензування, прийняття рішення щодо публікації та редагування проводилися незалежно, без його участі чи впливу. Будь-які потенційні конфлікти інтересів були повністю усунені шляхом зовнішнього контролю процесу. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Декларація про використання ШІ

Автори використовували *NotebookLM* для створення візуального контенту. Весь науковий контент та висновки були створені авторами. Остаточний текст був переглянутий та перевірений авторами.

Список використаної літератури

1. Shutty M. S., Cundiff G., DeGood D. E. Pain complaint and the weather: weather sensitivity and symptom complaints in chronic pain patients. Pain. 1992. Vol. 49, No. 2. P. 199–204. https://doi.org/10.1016/0304-3959(92)90143-y
2. Boychenko S. G., Zabarna O. G. Оцінювання комфортності погодних умов і тенденції їх змін на Київщині в умовах змін клімату. *Геофізичний журнал*. 2019. Vol. 41. No. 6. P. 128–143. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i6.2019.190071
3. Максименко Н. В., Міщенко В. Ю. Оцінка потенціалу екологічного туризму в Полтавській області за розрахунком патогенності погоди. *Проблеми охорони навколишнього природного середовища та екологічної*

безпеки: зб. наук. пр. / УКРНДІЕП; ХНУ імені В. Н. Каразіна Х.: ПП «Стиль-Іздат», 2023. Вип.45. С. 112-126. URL: http://www.niiep.kharkov.ua/sites/default/files/sbornik_2023.pdf

4. Баскакова Л. В., Максименко Н. В., Добронос П. А., Лидіна В. І. Моделювання і прогнозування зміни рівня патогенності погоди півдня Донецької області. *Охорона довкілля*: збірник наукових статей XVI Всеукраїнських наукових Таліївських читань. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2020. С. 6–10. URL: http://ecology.karazin.ua/wp-content/uploads/2020/11/taliev-2020.pdf
5. Максименко Н. В., Протасова О. С. Порівняльна оцінка кліматичної комфортності областей України для розвитку рекреації і туризму. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2024. № 30. С. 6-25. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2024-30-01
6. Li J., Sun R., Chen L. A review of thermal perception and adaptation strategies across global climate zones. Urban climate. 2023. Vol. 49. P. 101559. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101559
7. Matzarakis A., Mayer H., Iziomon M. G. Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *International journal of biometeorology.* 1999. Vol. 43, no. 2. P. 76–84. https://doi.org/10.1007/s004840050119
8. Daysarih T.-R., Ana S., Pablo F.-A. The meteorological contrast index in the context of climate change and public health. *MethodsX.* 2023. Vol. 11. P. 102331. https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102331
9. Budd G. M. Wet-bulb globe temperature (WBGT)–its history and its limitations. *Journal of science and medicine in sport.* 2008. Vol. 11, no. 1. P. 20–32. https://doi.org/10.1016/j.jsams.2007.07.003
10. Bandiera D. et al. Heat-related risk at Paris 2024: a proposal for classification and review of International Federations policies. *British journal of sports medicine*. 2024. P. bjsports–2024–108310. https://doi.org/10.1136/bjsports-2024-108310
11. Fiala D., Havenith G., Bröde P., Kampmann B., Jendritzky G. UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *International Journal of Biometeorology.* 2012. Vol. 56. No 3. P. 429-41. https://doi.org/10.1007/s00484-011-0424-7
12. Bröde P., Fiala D., Błażejczyk K., Holmér I., Jendritzky G., Kampmann B., Tinz B., Havenith G. Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International Journal of Biometeorology.* 2012. Vol. 56. P. 481-494. https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1
13. Błażejczyk, K., Twardosz, R. Long-term changes of bioclimatic conditions in Cracow (Poland). In R. Przybylak, R. Majorowicz, J. Brázdil, M. Kejna (Eds.), The Polish climate in the European context:An historical overview (pp. 235-246). 2010. Springer, Science+Business Media B.V. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3167-9_10
14. Romaszko J. et al. Universal Climate Thermal Index as a prognostic tool in medical science in the context of climate change: a systematic review. Science of the total environment. 2022. Vol. 828. P. 154492. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154492
15. Błażejczyk, A., Błażejczyk, K., Baranowski, J., Kuchcik, M. Heat stress mortality and desiredresponses of healthcare system in Poland. *International Journal of Biometeorology*. 2018. Vol. 62. No 3. P. 307-318. https://doi.org/10.1007/s00484-017-1423-0
16. Błażejczyk, K., Kuchcik, M., Błażejczyk, A., Milewski, P., Szmyd, J. Assessment of urban thermalstress by UTCI – experimental and modeling studies: an example from Poland. *Die Erde,* 2014. Vol. 144. No 1-2. P.105-116. https://doi.org/10.12854/erde-145-3
17. Pavliuk M. et al. Distribution of V.Boksha's Bioclimatic Index in Ukraine and the Development of an Automated Application for Its Determination. *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2025»*. 2025. Vol. 2025. P. 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.202552084
18. Бокша, В. Г. та Богуцький, Б. В. (1980). *Медична кліматологія та кліматотерапія* . Київ, Здоров'я. 261 с.
19. Ukraine Weather History. Local Weather Forecast, News and Conditions. Weather Underground. URL: https://www.wunderground.com/history/monthly/UKHH/date/2017-1 (дата звернення:: 25.03.2026)
20. УкрГМЦ – Погода в Україні, гідрологічна та радіаційна ситуація. УкрГМЦ. URL: https://www.meteo.gov.ua/ (дата звернення: 25.03.2026).
21. Air quality in Kharkiv. IQAir. URL: https://www.iqair.com/eu/ukraine/kharkiv (дата звернення: 25.03.2026)

Стаття надійшла до редакції 19.04.2026 Переглянуто 20.05.2026
Стаття рекомендована до друку 22.05.2026 Опубліковано 30.05.2026

N. V. MAKSYMENKO[1], DSc (Geography), Prof.,
Head of the Department of Environmental Monitoring and Protected Areas Management
e-mail: maksymenko@karazin.ua ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-7921-9990

D. S. DOLIA[1],
Student
e-mail: dmytro.dolia@student.karazin.ua ORCID ID: https://orcid.org/0009-0002-0283-4116

[1]*V. N. Karazin Kharkiv National University,*
4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

LONG-TERM DYNAMICS OF WEATHER PATHOGENICITY AND BIOCLIMATIC COMFORT IN THE CITY OF KHARKIV

Purpose. To determine the main trends of long-term changes in weather pathogenicity indicators in Kharkiv based on the methodology for determining weather pathogenicity indices adapted by the authors.

Methods. The assessment was carried out on the basis of the weather pathogenicity index (J), which takes into account the complex impact of the main meteorological parameters on the human body.

Results. The investigates the long-term dynamics of weather pathogenicity and bioclimatic comfort in the city of Kharkiv. The assessment was carried out using the weather pathogenicity index (J), which considers the combined influence of major meteorological parameters on the human body. Seasonal and interannual variability of the indicators during 2017–2025 was analyzed. Based on the analysis of the main meteorological indicators (air temperature and humidity, wind speed, atmospheric pressure and their daily fluctuations), it was established that the highest values of weather pathogenicity are characteristic of the cold period of the year. The highest pathogenicity values were found during the cold period of the year, whereas relatively comfortable weather conditions prevailed in summer. At this time, increased values of the J index are observed (>20), which is due to a combination of low temperatures, significant wind speed and sharp inter-daily fluctuations in meteorological indicators. In the summer season, the most comfortable bioclimatic conditions generally prevail. The average values of the J index during this period are the lowest for the year (J < 9), which is associated with the relative stability of atmospheric processes and lower contrast of meteorological parameters. The spring and autumn periods are characterized by significant instability of weather conditions and increased variability of the pathogenicity index. Interannual analysis demonstrated a tendency to increase the variability of the pathogenicity index values during the studied period.

Conclusions. The obtained results confirm the feasibility of using the weather pathogenicity index as an integral indicator for assessing the bioclimatic state of urbanized areas. The practical significance of the study lies in the possibility of applying the results for medical and meteorological forecasting, assessing the recreational potential of the territory, as well as developing measures for the adaptation of the population to adverse weather conditions in the context of climate change.

KEYWORDS*: climate change, weather pathogenicity, bioclimatic comfort, pathogenicity index, medical meteorology, urban climate*

Conflict of Interest

The authors certify that, although one of the authors of the article is a member of the editorial board of this journal, the peer review, publication decision, and editorial processes were conducted independently, without their participation or influence. Any potential conflicts of interest were fully mitigated through external oversight of the process.Furthermore, the authors have fully adhered to ethical norms, including avoiding plagiarism, data falsification, and duplicate publication.

Authors Contribution: all authors have contributed equally to this work.

AI Statement

The authors used NotebookLM to create visual content. All scientific content and conclusions were created by the authors. The final text was reviewed and verified by the authors.

References

1. Shutty M. S., Cundiff G., DeGood D. E. (1992). Pain complaint and the weather: weather sensitivity and symptom complaints in chronic pain patients. *Pain. 49*(2). 199–204. https://doi.org/10.1016/0304-3959(92)90143-y
2. Boychenko S. G., Zabarna O. G. (2019). Estimation of comfort of weather conditions and trends of their changes for the Kyiv region in the conditions of climate change. *Geofizicheskiy zhurnal. 41*(6). 128–143. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i6.2019.190071

3. Maksymenko, N. V., Mishchenko, V.Yu. (2023). Assessment of the potential of ecological tourism in the Poltava region based on the calculation of weather pathogenicity. *Problems of environmental protection and ecological safety: Collection of Scientific Papers.* Kharkiv : PP «Styl-Izdat», 45. 112-126. Retrieved from http://www.niiep.kharkov.ua/sites/default/files/sbornik_2023.pdf (in Ukrainian)
4. Baskakova, L.V., Maksymenko, N. V., Dobronos, P. A., Lydina, V. I. (2022). Modeling and forecasting changes in the level of the weather pathogenicity in the south of Donetsk region. In: *Environmental Protection: Collection of Scientific Papers from the 20th All-Ukrainian Taliev Readings. Kharkiv: V. N. Karazin National University.* 6–10. Retrieved from http://ecology.karazin.ua/wp-content/uploads/2020/11/taliev-2020.pdf (in Ukrainian)
5. Maksymenko, N. V., & Protasova, O. S. (2024). Comparative assessment of the climatic comfort of Ukrainian regions for the development of recreation and tourism. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology*, (30), 6-25. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2024-30-01
6. Li, J., Sun, R., Chen, L. (2023). A review of thermal perception and adaptation strategies across global climate zones. *Urban climate*. *49*. 101559. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101559
7. Matzarakis, A., Mayer, H., Iziomon, M. G. (1999). Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *International journal of biometeorology*, *43*(2), 76–84. https://doi.org/10.1007/s004840050119
8. Daysarih, T.-R., Ana, S., Pablo, F.-A. (2023). The meteorological contrast index in the context of climate change and public health. *MethodsX*. *11*, 102331. https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102331
9. Budd, G. M. (2008). Wet-bulb globe temperature (WBGT)–its history and its limitations. *Journal of science and medicine in sport. 11*(1), 20–32. https://doi.org/10.1016/j.jsams.2007.07.003
10. Bandiera D. Racinais,S., Garrandes,F., Adami, P.E.,Bermon, S., Pitsiladis,Y.P., Tessitore, A. (2024). Heat-related risk at Paris 2024: a proposal for classification and review of International Federations policies. *British journal of sports medicine*. 58(15), 108310. https://doi.org/10.1136/bjsports-2024-108310
11. Fiala, D., Havenith, G., Bröde, P., Kampmann, B., Jendritzky G. (2012). UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *International Journal of Biometeorology, 56(*3), 429-41. https://doi.org/10.1007/s00484-011-0424-7
12. Bröde, P., Fiala, D., Błażejczyk, K., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Tinz, B., Havenith, G. (2012). Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International Journal of Biometeorology, 56*, 481-494. . https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1
13. Błażejczyk, K., Twardosz, R. (2010). Long-term changes of bioclimatic conditions in Cracow (Poland).In R. Przybylak, R. Majorowicz, J. Brázdil, M. Kejna (Eds.), The Polish climate in the European context:An historical overview (pp. 235-246). Springer, Science+Business Media B.V. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3167-9_10
14. Romaszko J.,Dragańska E., Jalali R.,Cymes I.,Glińska-Lewczuk K. (2022). Universal Climate Thermal Index as a prognostic tool in medical science in the context of climate change: a systematic review. *Science of the Total Environment, 828,* 154492. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154492
15. Błażejczyk, A., Błażejczyk, K., Baranowski, J., Kuchcik, M. (2018). Heat stress mortality and desiredresponses of healthcare system in Poland. *International Journal of Biometeorology*, 62(3), 307-318. https://doi.org/10.1007/s00484-017-1423-0
16. Błażejczyk, K., Kuchcik, M., Błażejczyk, A., Milewski, P., Szmyd, J. (2014). Assessment of urban thermal-stress by UTCI – experimental and modeling studies: an example from Poland. *Die Erde,* 144(1-2),105-116. https://doi.org/10.12854/erde-145-3
17. Pavliuk M., Fedoniuk, V., Vavdiuk N., Fedoniuk Yu. (2025). Distribution of V.Boksha's Bioclimatic Index in Ukraine and the Development of an Automated Application for Its Determination. *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2025»*. https://doi.org/10.3997/2214-4609.202552084
18. Boksha, V. G. and Bogutsky, B. V. (1980). *Medical Climatology and Climatotherapy*. Kyiv, Zdorovya. 261. (in Ukrainian)
19. Ukraine Weather History. Local Weather Forecast, News and Conditions. Weather Underground. Retrieved from https://www.wunderground.com/history/monthly/UKHH/date/2017-1
20. UkrGMC – Weather in Ukraine, hydrological and radiation situation. UkrGMC. Retrieved from https://www.meteo.gov.ua/ (in Ukrainian)
21. Air quality in Kharkiv. IQAir. Retrieved from https://www.iqair.com/eu/ukraine/kharkiv

The article was received by the editors 19.04.2026 The article was revised 20.05.2026
The article is recommended for printing 22.05.2026 This article published 30.05.2026

https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-03
УДК 504.3.054:519.2

С. Я. АДАМЕНКО[1],
аспірант кафедри екології
e-mail: stanislav.adamenko-a101-23@nung.edu.ua ORCID ID: https://orcid.org/0009-0008-1678-0036

Л. М. АРХИПОВА[1], д-р техн. наук,
професорка кафедри екології
e-mail: konsevich@ukr.net ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-8725-6943

[1]*Івано-Франківській національний технічний університет нафти і газу,*
вул. Карпатська, 15; м. Івано-Франківськ; 76019; Україна

ОЦІНКА ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ З УРАХУВАННЯМ ВИПАДКОВОГО ХАРАКТЕРУ КОНЦЕНТРАЦІЙ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН

Мета. Аналіз стану атмосферного повітря, визначення основних факторів формування забруднення та обґрунтування методики оцінювання гарантованої якості повітря з урахуванням випадкового характеру концентрацій забруднювальних речовин

Методи. Статистичні та розрахунок комплексного індексу забруднення атмосфери (КІЗА).

Результати. Дослідження проведено на основі даних станції громадського моніторингу Eco-City станції №1162 в районі хімічного факультету Ужгородського національного університету з урахуванням кліматичних і орографічних особливостей території. Встановлено, що основним джерелом забруднення атмосферного повітря є автотранспорт. Виявлено виражену сезонність змін концентрацій забруднювальних речовин. Формальдегід визначено головним чинником перевищення індексів забруднення атмосфери, при цьому значення КІЗА часто відповідали рівню «дуже високого» забруднення. Найбільш критичні показники зафіксовано: для формальдегіду – протягом усього року з максимальними значеннями у січні та липні; для дрібнодисперсного пилу PM2.5 і PM10 – у зимовий період через вплив опалювального сезону та несприятливих умов розсіювання; для діоксиду азоту – у квітні, що пов'язано з транспортним навантаженням. Оцінка якості атмосферного повітря засвідчила систематичне перевищення нормативів для формальдегіду протягом року.

Висновки. Результати дослідження свідчать про напружений екологічний стан атмосферного повітря в районі дослідження та необхідність посилення контролю за викидами забруднюючих речовин. Пріоритетними заходами є оптимізація транспортних потоків, зменшення викидів у період опалювального сезону та вдосконалення локальних систем моніторингу атмосферного повітря, особливо щодо контролю джерел формальдегіду.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *атмосферне повітря, індекс забруднення атмосфери, забруднюючі речовини, концентрації елементів, гарантована якість*

Як цитувати: Адаменко С. Я., Архипова Л. М. Оцінка якості атмосферного повітря з урахуванням випадкового характеру концентрацій забруднюючих речовин. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2026. Вип. 34. С. 42-53. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-03

In cites: Adamenko, S. Y., & Arkhypova, L M. (2026). Assessment of atmospheric air quality considering the stochastic nature of pollutant concentrations. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology*, (34), 42-53. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-03 (in Ukrainian)

Вступ

Якість атмосферного повітря є одним із ключових чинників, що визначають екологічний стан територій та рівень безпеки населення. У сучасних умовах урбанізації та інтенсивного розвитку транспортної інфраструктури проблема накопичення забруднюючих речовин у повітрі набуває особливої актуальності. За даними міжнародних екологічних організацій, значна частина населення світу постійно перебуває під впливом концентрацій домішок, що перевищують рекомендовані нормативні значення [1, 2].

© Адаменко С. Я., Архипова Л. М., 2026
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0

В Україні проблеми погіршення якості повітря особливо актуальні у великих містах та промислових регіонах, де спостерігається перевищення гігієнічних нормативів (ГДК) за ключовими забруднювачами (PM2.5, PM10, SO_2, NO_2, CO, озон) [3]. Попри нормативно-правові акти та міжнародні директиви, ефективний контроль та оцінка стану атмосферного повітря залишається недостатньо реалізованою, що обумовлює потребу у наукових дослідженнях щодо моніторингу, математичного моделювання та прогнозування забруднення [4].

У науковій літературі значна увага приділяється впливу атмосферного забруднення на здоров'я населення та функціонування екосистем. Дослідження Di et al. підтверджують наявність статистично значущого зв'язку між тривалим впливом забрудненого повітря та зростанням рівня смертності населення [5]. Результати міжнародних досліджень також свідчать, що дрібнодисперсні частинки, оксиди азоту та вторинні органічні сполуки є одними з найбільш небезпечних компонентів міського повітряного середовища.

Відповідно до даних дослідження «Global Burden of Disease» Інституту метрики та оцінки здоров'я (IHME), у 2024 році наслідком впливу забрудненого повітря стала смерть майже 4,9 млн осіб [6]. У структурі світової смертності це становить близько 9 % від загальної кількості летальних випадків [7].

Особливу увагу дослідники приділяють формальдегіду як одному з найнебезпечніших вторинних забруднювачів. У роботах Wu et al. встановлено, що формальдегід бере активну участь у процесах фотохімічного смогоутворення та формуванні вторинних аерозолів [8]. Liu et al. довели вагому роль транспортних викидів у формуванні підвищених концентрацій формальдегіду в урбанізованих районах із високою інтенсивністю руху транспорту [9].

Окрему увагу сучасні дослідники приділяють питанням зменшення антропогенного навантаження на атмосферне повітря у містах. Зокрема, Manzueta et al. підкреслюють ефективність комплексних заходів щодо скорочення викидів у житловому секторі та в опалювальний період для покращення якості атмосферного повітря [10]. Це свідчить про необхідність впровадження сучасних систем моніторингу та розроблення нових підходів до оцінювання якості атмосферного повітря з урахуванням випадкового характеру концентрацій забруднювальних речовин.

Під час оцінювання стану атмосферного повітря у населених пунктах та в межах виробничих територій основним орієнтиром виступають гігієнічні нормативи – гранично допустимі концентрації хімічних і біологічних домішок. Дотримання встановлених нормативних значень спрямоване на обмеження негативного впливу забруднювальних речовин на здоров'я людини та забезпечення безпечних умов проживання населення [11, 12].

У працях, присвячених моніторингу атмосферного повітря, підкреслюється необхідність застосування комплексних підходів до оцінювання екологічного стану територій [13]. Значного поширення набули методики розрахунку індексу забруднення атмосфери (ІЗА), які дозволяють оцінювати рівень антропогенного навантаження та порівнювати екологічний стан різних міст і регіонів.

Сучасні дослідження також акцентують увагу на доцільності використання імовірнісних та статистичних методів оцінювання якості атмосферного повітря. Це пов'язано з тим, що концентрації забруднювальних речовин мають випадковий характер і змінюються під впливом метеорологічних умов, сезонних факторів та інтенсивності викидів [14].

Попри значну кількість наукових праць, питання оцінювання гарантованої якості атмосферного повітря з урахуванням стохастичного характеру концентрацій забруднювачів залишається недостатньо дослідженим [15]. Саме тому актуальним є вдосконалення підходів до аналізу стану повітряного середовища на основі інтегральних та імовірнісних показників.

Під «гарантованою якістю атмосферного повітря» у роботі розуміється такий стан повітряного середовища, за якого з певною статистичною ймовірністю концентрації забруднюючих речовин не перевищують встановлені гігієнічні нормативи. Таким чином, показник гарантованої якості характеризує ступінь екологічної безпеки атмосферного повітря з урахуванням випадкової мінливості концентрацій домішок у часі.

Метою роботи є аналіз стану атмосферного повітря, визначення основних факторів формування забруднення та обґрунтування методики оцінювання гарантованої якості повітря з урахуванням випадкового характеру концентрацій забруднювальних речовин.

Матеріали і методи

Для проведення дослідження використовувалися результати спостережень за станом атмосферного повітря, отримані з відкритої системи громадського моніторингу Eco-City. Аналіз виконано на основі даних станції №1162, яка розташована поблизу хімічного факультету Ужгородського національного університету.

Слід зазначити, що система громадського моніторингу Eco-City базується на використанні сенсорних модулів, результати яких можуть містити додаткові невизначеності порівняно з сертифікованими державними постами спостережень. Калібрування сенсорів здійснювалося відповідно до процедур, передбачених платформою Eco-City, а отримані результати порівнювалися з фізично допустимими діапазонами концентрацій.

Для підвищення достовірності аналізу використовувалися процедури попередньої обробки даних, зокрема видалення аномальних значень, перевірка часової узгодженості вимірювань та усереднення короткоперіодичних коливань.

Під час аналізу враховувалося, що типові похибки сенсорів громадського моніторингу, за даними літературних джерел, можуть становити 10-20% залежно від типу забруднюючої речовини та метеорологічних умов [16]. Пропуски даних, які не перевищували 5% від загального масиву спостережень, не включалися до статистичного аналізу.

Досліджувалися концентрації формальдегіду, аміаку, діоксиду азоту, оксиду вуглецю та дрібнодисперсних твердих частинок PM2.5 і PM10. Також враховувалися супутні метеорологічні параметри: температура повітря, атмосферний тиск та відносна вологість.

Для аналізу були обрані дані спостережень за січень, квітень, липень та жовтень 2023 року. Такий вибір дозволив оцінити сезонні особливості зміни рівнів забруднення атмосферного повітря. Первинні показники концентрацій були приведені до єдиної системи одиниць вимірювання, що забезпечило можливість подальших розрахунків.

Оцінювання рівня забруднення виконувалося із застосуванням індексу забруднення атмосфери (ІЗА) та комплексного індексу забруднення атмосферного повітря. Для кожної речовини визначався ступінь перевищення нормативних значень гранично допустимих концентрацій.

У процесі дослідження концентрації забруднювальних речовин розглядалися як випадкові величини, значення яких змінюються під впливом природних і антропогенних факторів [17-19]. Для оцінювання гарантованої якості атмосферного повітря використовувався імовірнісний підхід, заснований на визначенні частоти випадків, коли концентрації не перевищували встановлені нормативи [20-21].

Концентрації забруднюючих речовин розглядалися як випадкові величини, для яких визначалися основні статистичні характеристики: середнє значення, медіана, стандартне відхилення та коефіцієнт варіації. Для перевірки характеру розподілу даних застосовувався критерій Шапіро-Уїлка. У випадках відхилення розподілу від нормального використовувалися непараметричні оцінки та аналіз емпіричних частот перевищення гранично допустимих концентрацій.

Імовірність гарантованої якості атмосферного повітря оцінювали як статистичну ймовірність неперевищення нормативних значень:

$$P = \frac{m_c}{m}, \qquad (1)$$

де m_c – кількість випадків, коли концентрація не перевищувала ГДК;

m – загальна кількість спостережень.

Для оцінювання статистичної надійності отриманих імовірнісних оцінок визначалися 95% довірчі інтервали на основі біноміального розподілу:

$$CI = p \pm 1.96\sqrt{\frac{p(1-p)}{n}}, \qquad (2)$$

де p – оцінена ймовірність неперевищення нормативу,

n – кількість спостережень.

Отримані результати дозволили оцінити рівень екологічної безпеки території дослідження та визначити речовини, які найбільше впливають на формування забруднення атмосферного повітря.

Результати та обговорення

За особливостями метеорологічних умов місто Ужгород характеризується підвищеним потенціалом накопичення забруднювальних речовин у атмосферному повітрі та недостатньо сприятливими умовами для розсіювання промислових викидів [22]. Важливу роль у цьому відіграє географічне положення міста, яке обмежує інтенсивність природного

повітрообміну. Значну частину року, приблизно 65–67 % днів, спостерігаються штильові умови або дуже слабкий вітер зі швидкістю до 1 м/с. За таких умов домішки тривалий час утримуються у приземному шарі атмосфери, що сприяє формуванню смогових явищ та подальшому осіданню забруднювальних речовин. Основними джерелами забруднення атмосферного басейну міста є як стаціонарні об'єкти, так і пересувні джерела викидів, серед яких провідну роль відіграє автомобільний транспорт.

Моніторинг забруднення повітря в місті Ужгороді проводиться лабораторією спостережень за забрудненням повітря (ЛСЗА) Закарпатського ЦГМ, починаючи з 1992-го року. Стан атмосферного повітря м. Ужгород контролюється на двох стаціонарних базових постах спостереження (ПСЗ), які розташовані: ПСЗ №1 – в адміністративно-житловому районі міста, проспект Свободи, 2; ПСЗ № 2 – в промисловому районі, вул. Сергія Мартина.

Відбір проб повітря проводиться 4 рази на добу (для визначення вмісту діоксиду сірки, діоксиду та оксиду азоту, формальдегіду) та 2 рази на добу (для визначення вмісту пилу, розчинних сульфатів, оксиду вуглецю, 8 важких металів), крім вихідних та святкових днів. Засоби вимірювальної техніки, що використовуються в роботі, проходять державну повірку.

За даними державних статистичних спостережень Головного управління статистики у 2025 році забруднюючих речовин від стаціонарних джерел забруднення Закарпатської області склали 3,7 тис. тонн. З загальної кількості викидів, частка м. Ужгород склала 3,2% (120,6 т), у тому числі діоксид сірки 9,8 т та діоксид азоту 8,8 т. (рис.1).

Для визначення ступеня забруднення атмосферного повітря за методикою що викладена вище ми скористувалися базою даних станції №1162 Eco-City.

Ця станція розташована біля корпусу хімічного факультету Ужгородського національного університету (вул. Підгірна 46). Станція проводить виміри: формальдегіду, аміаку, діоксид азоту, вуглецю оксид, твердих частинок (PM2.5, PM10) та метеопараметрів (температура, вологість, тиск).

Для станції №1162 ми обрали дані з січня по грудень 2023 року. У загальному ексель-таблиця складається з восьми колонок та 130 297 рядків даних. Показники виміру у таблиці подані у міжнародній системі вимірювання: формальдегід у ppb; аміак, діоксид азоту, вуглецю оксид – ppm; тверді частинки (PM2.5, PM10) – ug/m³; температура – ºB, вологість – %; тиск – Pa.

На основі проведених розрахунків визначено показники, що характеризують рівень забруднення атмосферного повітря окремими речовинами, а також обчислено комплексний індекс сумарного забруднення атмосфери.

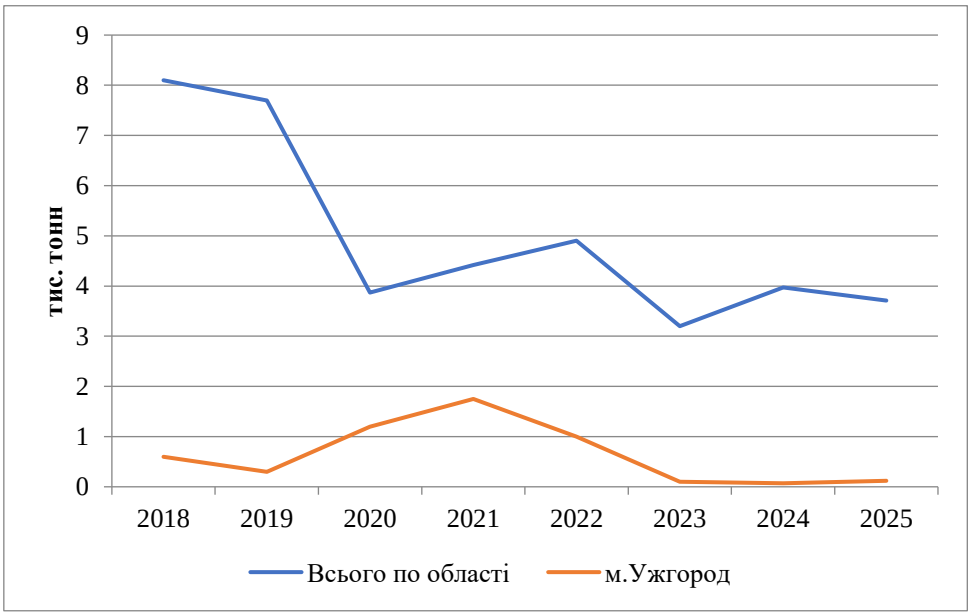


Рис. 1 – Динаміка викидів забруднюючих речовин

Fig. 1 – Dynamics of pollutant emissions

Для візуалізації отриманих значень побудовані графіки, які представляють динаміку добових значень індексу забруднення атмосфери (ІЗА) для ключових забруднюючих речовин за чотири контрольні місяці (січень, квітень, липень, жовтень). Кожен графік відображає рівень антропогенного та природного навантаження на повітряне середовище:

1) ІЗА формальдегіду – це один із найбільш критичних показників. На графіку видно, що значення ІЗА часто коливаються в межах 15-35 одиниць. Найбільш нестабільна ситуація спостерігається у липні (червона лінія) та січні (блакитна лінія). Зокрема, у січні зафіксовано різкий аномальний стрибок (пік) близько 20-го числа, що перевищив позначку 45. Це може бути пов'язано з температурними інверсіями, які перешкоджають розсіюванню газів (рис. 2а).

2) ІЗА діоксиду азоту – графік показує виражену сезонність. Найвищі рівні забруднення характерні для квітня (зелена лінія), де на початку місяця (4-5 числа) індекс сягає максимуму – понад 2,0. Липень та жовтень демонструють значно нижчі та стабільніші показники (в межах 0,1-0,3) (рис. 2б).

3) ІЗА аміаку – тут чільне місце посідає липень (червона лінія). Протягом усього місяця спостерігаються високі показники з піком 13-го числа (понад 0,0020). Це часто пояснюється активізацією процесів гниття органіки та промисловими викидами в умовах високих температур (рис. 2в).

4) ІЗА оксиду вуглецю – оксид вуглецю має меншу амплітуду коливань. Найвищі середні значення зафіксовані у січні (0,04–0,07) та жовтні (0,04–0,05). Це корелює з роботою автотранспорту та систем опалення. Найнижчий рівень зафіксовано у квітні (рис. 2г).

5) ІЗА твердими частинками (PM2.5 та PM10) – ці графіки є найбільш показовими щодо якості повітря в розрізі опалювального сезону: (рис. 3). Січень (блакитна лінія) – демонструє екстремальні піки для обох типів пилу. Для PM2.5 індекс піднімається вище 3,0, а для PM10 – майже до 1,0. Основні сплески припадають на 3-тє, 12-те та 30-те числа. Інші місяці – показники для квітня, липня та жовтня залишаються стабільно низькими (майже на нульовому рівні порівняно з січнем), що підтверджує вплив спалювання твердого палива та специфічних метеоумов взимку.

Завершальний графік інтегрує всі вищезгадані домішки в єдиний середньодобовий показник – комплексний індекс забруднення атмосферного повітря – КІЗАсд (рис. 4).

Загальний тренд графіку характеризується постійним високим рівнем забруднення, оскільки значення КІЗА майже ніколи не опускаються нижче 10. Найбільш забрудненим місяцем за сукупністю факторів виступає липень (червона лінія) з частими піками понад 30, та січень (блакитна лінія), де спостерігається найвищий разовий пік року – близько 45 одиниць.

Аналіз свідчить про те, що основними проблемами є формальдегід (протягом усього року) та дрібнодисперсний пил (у зимовий період). Високі значення КІЗА (понад 14 вважається «дуже високим» рівнем) вказують на значне екологічне навантаження на регіон, де проводилися вимірювання.

Підвищені концентрації формальдегіду можуть бути пов'язані як із транспортними викидами, так і з локальними джерелами антропогенного походження, що потребує додаткових досліджень.

Розрахунок гарантованої якості атмосферного повітря проводився на основі даних про фактичні концентрації та ГДКсд за формулами ймовірності неперевищення нормативів.

1. Вихідні дані та ГДК (розрахунок проведений без врахування даних PM10 і PM2.5 так як для них ГДКсд не встановлено):

– період спостережень: січень (31 день), квітень (30 днів), липень (31 день), жовтень (31 день) 2023 року. Загальна кількість днів спостережень (m) 123 дня.

– ГДКсд: формальдегід 0,003 мг/м³; аміак 0,04 мг/м³; діоксид азоту 0,04 мг/м³; вуглецю оксид 3,0 мг/м³.

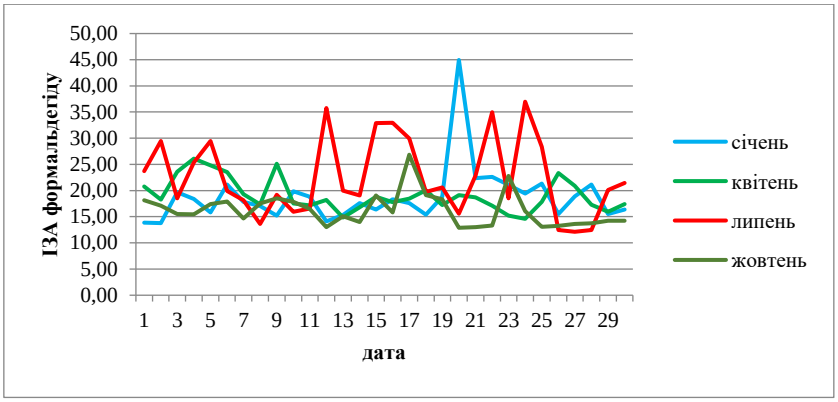
2. Розрахунок ймовірностей неперевищення ГДК для кожної речовини.

Ми використовуємо формулу ймовірності для кожної речовини ($P_{\text{сд}j}$):

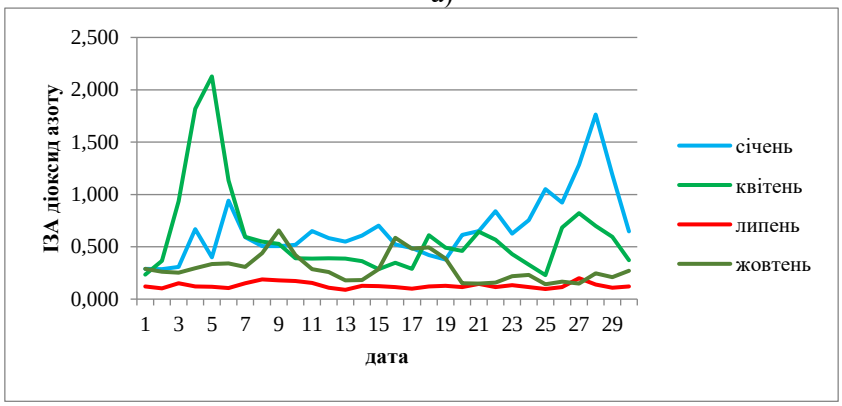
$$P_{\text{сд}j} = \frac{m_{\text{сj}}}{m}, \qquad (3)$$

де m_{cj} – кількість днів, коли концентрація j-тої речовини $\leq$ ГДКсд.

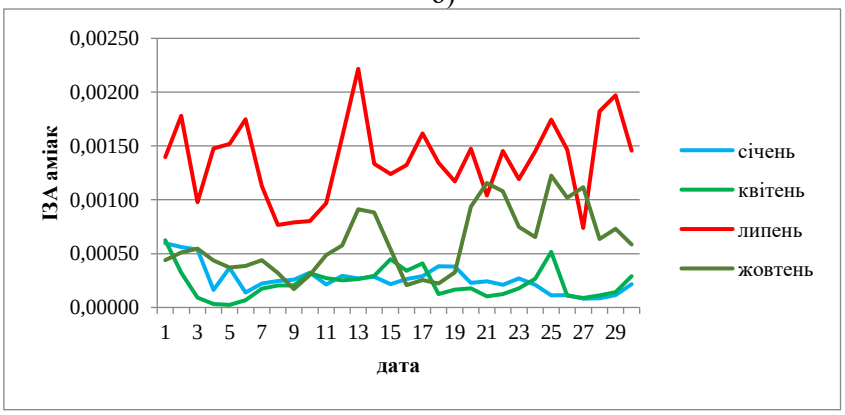
Концентрації забруднюючих речовин розглядалися як випадкові величини, для яких визначалися середні значення та варіабельність. Імовірність непревищення нормативів оцінювалася за емпіричними частотами спостережень. Отримані результати інтерпрету-



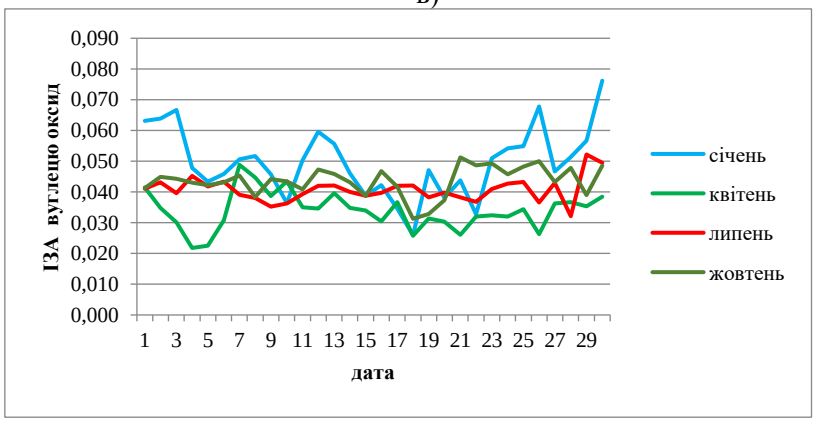
а)



б)

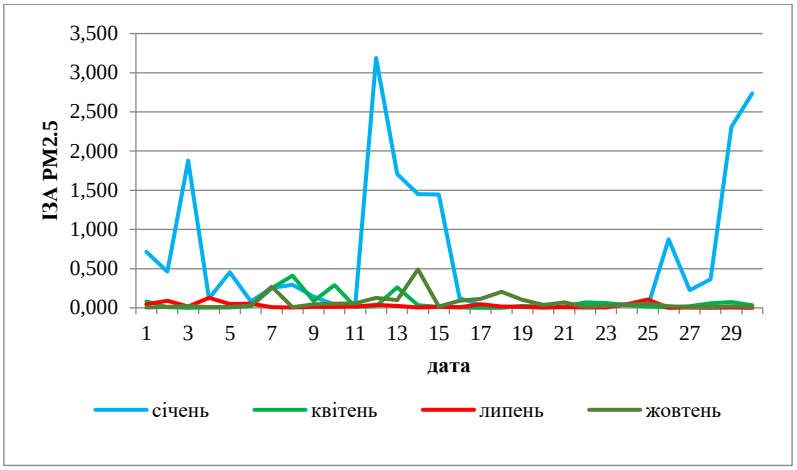


в)

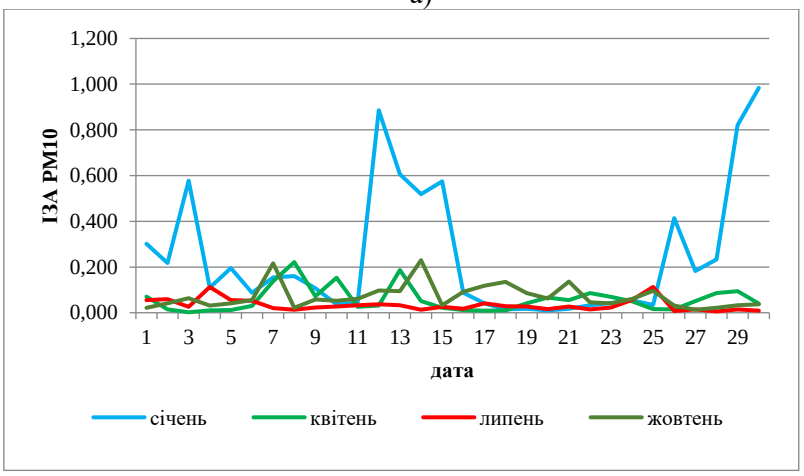


г)

Рис. 2 – Динаміка ІЗА формальдегіду (а), діоксиду азоту (б), аміаку (в), оксиду вуглецю (г)
Fig. 2 – Dynamics of ISA of formaldehyde (a), nitrogen dioxide (b), ammonia (c), carbon monoxide (d)



а)



б)

Рис. 3 – Динаміка ІЗА твердими частинками: а – PM2.5 та б – PM10

Fig. 3 – Dynamics of ISA by solid particles: a – PM2.5 and b – PM10

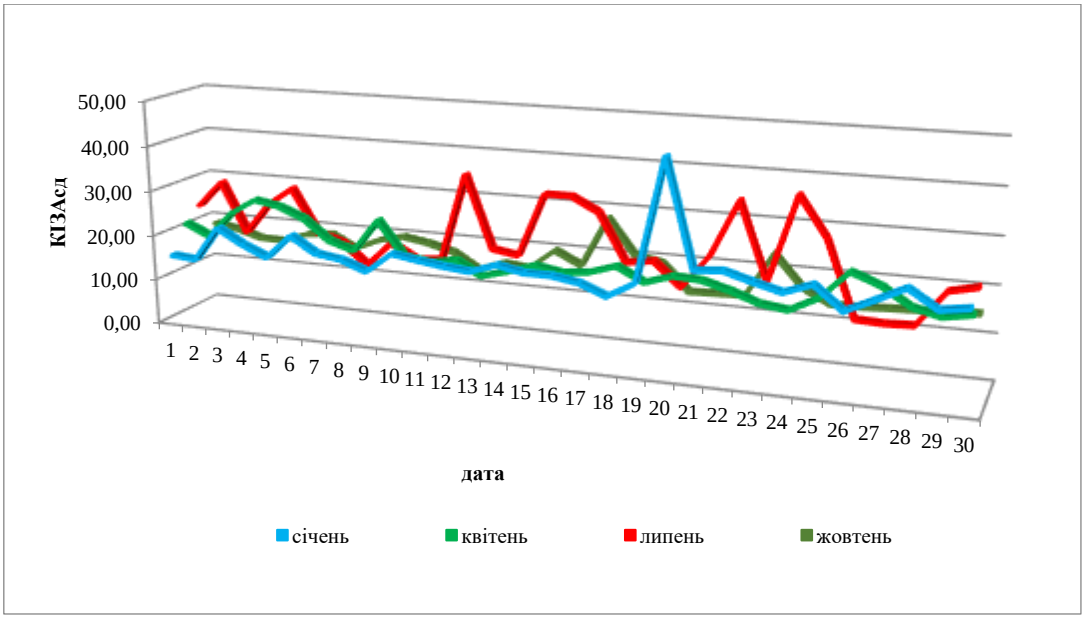


Рис. 4 – Динаміка комплексного індексу забруднення атмосферного повітря

Fig. 4 – Dynamics of the complex index of atmospheric air pollution

валися як статистичні оцінки гарантованої якості атмосферного повітря.

Після проведення розрахунків отримаємо наступні значення:

– формальдегід: концентрації коливаються від ~0,0104 мг/м³ до ~0,0201 мг/м³. Всі виміряні значення перевищують ГДКсд 0,003 мг/м³.

$$m_{\text{с формальдегід}}=0;$$
$$P_{\text{сд формальдегід}}=0/123=0.$$

– аміак: концентрації коливаються від ~0,0028 мг/м³ до ~0,0087 мг/м³. Всі виміряні значення нижчі за ГДКсд 0,04 мг/м³.

$$m_{\text{с аміак}}=123;$$
$$P_{\text{сд аміак}}=123/123=1.$$

– діоксид азоту: концентрації коливаються від ~0,0184 мг/м³ до ~0,0514 мг/м³. Значення часто перевищують ГДКсд 0,04 мг/м³ (наприклад, 4, 5 квітня, 25, 27, 29, 30 січня).

$$m_{\text{с діоксид азоту}}<123;$$
$$P_{\text{сд діоксид азоту}}<1.$$

– вуглецю оксид: концентрації коливаються від ~1,15 мг/м³ до ~1,57 мг/м³. Всі виміряні значення нижчі за ГДКсд 3,0 мг/м³.

$$m_{\text{с вуглецю оксид}}=123;$$
$$P_{\text{сд вуглецю оксид}}=123/123=1.$$

Розрахунок комплексної гарантованої якості повітря – комплексна ймовірність неперевищення ($P_{\text{сд}}$) визначається як частка днів, коли всі речовини одночасно не перевищували своїх ГДКсд.

Оскільки ми маємо нульову ймовірність для формальдегіду ($P_{\text{сд формальдегід}}=0$) та ненульову кількість перевищень для діоксиду азоту, кількість днів, коли всі чотири речовини одночасно були в межах норми ($m_{\text{с}}$), дорівнює нулю.

Якщо провести аналогічний розрахунок, коли значення формальдегіду були б меншими за середньодобове ГДК тоді б ми отримали наступні значення – гарантована якість атмосферного повітря (без урахування формальдегіду) становила б 0,943 (або 94,3%). Це свідчить про те, що з імовірністю 94,3 % стан атмосферного повітря відповідав би встановленим санітарно-гігієнічним нормативам. Водночас навіть за таких умов основним чинником, що знижує гарантовану якість атмосферного повітря, залишався б діоксид азоту, перевищення концентрацій якого найчастіше фіксувалися у зимовий та весняний періоди.

Отримані значення ймовірностей свідчать про статистично стійкий характер перевищення нормативних значень для формальдегіду протягом усього періоду спостережень. Для аміаку та оксиду вуглецю ймовірність неперевищення гранично допустимих концентрацій наближалася до одиниці, що вказує на стабільне дотримання нормативних вимог. Для діоксиду азоту встановлено періодичні перевищення ГДК, які спричиняли зниження показника гарантованої якості атмосферного повітря переважно у зимовий та весняний періоди.

Висновки

Кліматичні та орографічні особливості м. Ужгород створюють несприятливі умови для розсіювання забруднювальних речовин у приземному шарі атмосфери. Значна повторюваність малих швидкостей вітру та тривалі періоди штилю сприяють накопиченню домішок у повітряному середовищі й посиленню антропогенного навантаження. Основними джерелами забруднення атмосферного повітря міста є пересувні джерела викидів, насамперед автомобільний транспорт, тоді як внесок стаціонарних джерел у загальному обсязі викидів області залишається порівняно невисоким.

Аналіз результатів громадського моніторингу атмосферного повітря (станція №1162) за 2023 рік виявив чітко виражену сезонну диференціацію рівнів забруднення. Найбільш критичні концентрації формальдегіду спостерігалися протягом усього року з максимальними значеннями у зимовий та літній періоди. Для дрібнодисперсних частинок PM2.5 і PM10 характерним було зростання концентрацій у холодний період року, що пов’язано з опалювальним сезоном та несприятливими умовами розсіювання. Підвищені концентрації діоксиду азоту фіксувалися переважно навесні та корелювали з інтенсивністю транспортного навантаження.

Результати розрахунку індексу забруднення атмосфери (ІЗА) показали, що формальдегід є визначальним чинником формування високого рівня забруднення повітряного середовища. Комплексний індекс забруднення атмосферного повітря у більшості випадків перевищував рівень, який характеризується як «дуже високий», а максимальні значення були зафіксовані у січні та липні, що свідчить про суттєве екологічне навантаження на територію дослідження.

Оцінювання гарантованої якості атмосферного повітря із застосуванням імовірнісного

підходу підтвердило критичну ситуацію щодо формальдегіду, для якого протягом усього періоду спостережень реєструвалися перевищення нормативних значень. Водночас концентрації аміаку та оксиду вуглецю переважно відповідали встановленим нормативам, тоді як для діоксиду азоту періодично фіксувалися перевищення у зимово-весняний період.

Отримані результати свідчать про необхідність удосконалення системи моніторингу атмосферного повітря, посилення контролю за транспортними та локальними джерелами викидів, а також впровадження природоохоронних заходів, спрямованих на зниження концентрацій формальдегіду, оксидів азоту та дрібнодисперсних частинок у міському середовищі. Особливої уваги потребує дослідження потенційних локальних джерел формальдегіду в районі розташування станції спостереження.

Запропонований підхід може бути використаний для оперативного статистичного оцінювання якості атмосферного повітря на основі даних автоматизованих систем громадського моніторингу.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Внесок авторів: автори зробили рівний внесок у цю роботу.

Декларація про використання ШІ

В роботі не використано ресурс штучного інтелекту

Список використаної літератури

1. *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization. 2021. URL: https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228?utm_source=chatgpt.com
2. Баштаннік, М. П., Жемера, Н. С., Кіптенко, Є. М., & Козленко, Т. В. Стан забруднення атмосферного повітря над територією України. *Наукові праці УкрНДГМІ,* 2024. Вип. *266*, С. 70–93. URL: https://old.uhmi.org.ua/pub/np/266/Bashtannik_Zhemera_Kiptenko_Kozlenko_266.pdf
3. *Реформа моніторингу та управління якістю повітря*. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. 2019. URL: https://mepr.gov.ua/diyalnist/reformy/kompleksnyj-monitoryng-dovkillya/
4. Adamenko, S. Y., Arkhypova, L. M., Adamenko, Y. O., Moskaliuk, N. M., Hlibovytska, N. I., & Chupa, V. M. Patterns of PM10 particles change in the atmospheric air of Ivano-Frankivsk city. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2024. Vol. *1415*. No 1. 012002. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1415/1/012002
5. Di, Q., Wang, Y., Zanobetti, A., Wang, Y., Koutrakis, P., Choirat, C., Dominici, F., & Schwartz, J. D. Air pollution and mortality in the Medicare population. *New England Journal of Medicine*. 2020. Vol. 376. No 26. P.2513–2522. https://doi.org/10.1056/NEJMoa1702747
6. *Global Burden of Disease Study (GBD): Air pollution*. 2024. University of Washington. https://www.healthdata.org/research-analysis/health-topics/air-pollution?utm_source=chatgpt.com
7. Brauer, M., et al. Global burden and strength of evidence for 88 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2021. *The Lancet*. 2024. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(24)00933-4
8. Wu, Y., Wang, M., Lu, K., Zhang, Y., & Zhang, Y. Production and loss of atmospheric formaldehyde at a suburban site in northern China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2023. Vol. *23*. P. 2997–3015. https://doi.org/10.5194/acp-23-2997-2023
9. Liu, S.-Q., Ma, H.-N., Tang, M.-X., Shao, Y.-M., Yao, T.-T., He, L.-Y., & Huang, X.-F. Decoding the primacy of transportation emissions of formaldehyde pollution in an urban atmosphere. *Toxics*, 2025. Vol.13. No *8*. P. 643. https://doi.org/10.3390/toxics13080643
10. Manzueta, R., Kumar, P., Ariño, A. H., & Martín-Gómez, C. Strategies to reduce air pollution emissions from urban residential buildings. *Science of the Total Environment*, 2024. Vol. *947*. 175809. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175809
11. *Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року* (Закон України № 2697-VIII). 2019. Законодавство України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text
12. *Про охорону атмосферного повітря* (Закон України № 2707-XII). Законодавство України. 1992 URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12#Text

13. Arkhypova, L. M., Adamenko, S. Y., Adamenko, Y. O., Kachala, T. B., & Kachala, S. V. Modeling the dependence of ambient air pollution on meteorological factors: A case study from Ukraine. *Journal of Physics: Conference Series,* 2025. Vol. *3153. No* 1., 012021. https://doi.org/10.1088/1742-6596/3153/1/012021
14. Bernacki J., Scherer R. (2025). A Comprehensive Review of Data-Driven Techniques for Air Pollution Concentration Forecasting. *Sensors (Basel),* 25(19),6044. https://doi.org/10.3390/s25196044
15. Кольцов, М., Шевченко, Л. *Моніторинг якості атмосферного повітря: український та міжнародний досвід: аналітична записка*. ГО «Фундація «Відкрите Суспільство». 2020. URL: https://osf.org.ua/data/blog_dwnl/Analitichna_zapiska_atmosferne_povitrya.pdf
16. Сорока, М. Л. (Ред.). *Radiation and Smog Alarm. Настанови та принципи оповіщення населення про якість повітря, радіаційну та хімічну небезпеку*. 2022. Arnika. https://cleanair.org.ua/wp-content/uploads/2023/01/cleanair.org.ua-uaqi-radiation-and-smog-alarm-presentation-soroka.pdf
17. Klymchuk, I.,Arkhypova, L. Research on climate change in the Carpathian Region: Consequences and challenges for ski resorts. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*. 2023. Vol. 14. No 1. P. 66–74. https://doi.org/10.69628/esbur/2.2023.19
18. Матвійчук, В. К., Чугаєнко, Ю. О., Савенков, О. І. Екологічна політика в системі державного управління національним господарством. Національна академія управління. 2023. URL: https://nam.kyiv.ua/files/publications/978-966-8406-83-6-monog.pdf
19. Деякі питання здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря (Постанова № 827). Законодавство України. (2019). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/827-2019-%D0%BF#Text
20. Некос, А. Н., Кравченко, О. К. Оцінка стану та динаміки забруднення атмосферного повітря малих міст Харківської області. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*, 2012. №1-2. С.122–127. URL: http://luddovk.univer.kharkov.ua/sites/default/files/Papers/19-12-17.pdf
21. Фалько В.В. Оцінка гарантованої якості атмосферного повітря для рослин на прикладі парка ім. Т. Г. Шевченка, м. Дніпро. *Екологічні науки* № 6(45). С. 153-157. URL: https://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2022/6/24.pdf
22. Рибалова, О. В., Бєлан, С. В., Артем'єв, С. Р. Визначення екологічного ризику погіршення стану атмосферного повітря з урахуванням хімічної небезпеки регіонів України. *Проблеми надзвичайних ситуацій,* 2023. *18,* С.196–209. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pns_2013_18_25

Стаття надійшла до редакції 16.04.2026 Переглянуто 18.05.2026
Стаття рекомендована до друку 21.05.2026 Опубліковано 30.05.2026

S. Y. ADAMENKO[1],
PhD Student of the Department of Ecology
e-mail: stanislav.adamenko-a101-23@nung.edu.ua ORCID ID: https://orcid.org/0009-0008-1678-0036

L. M. ARKHYPOVA[1], DSc (Technical),
Professor of the Department of Ecology
e-mail: konsevich@ukr.net ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-8725-6943

[1]Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,
15, Karpatska Str., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine

ASSESSMENT OF ATMOSPHERIC AIR QUALITY CONSIDERING THE STOCHASTIC NATURE OF POLLUTANT CONCENTRATIONS

Purpose. Analysis of the state of atmospheric air, determination of the main factors of pollution formation and substantiation of the methodology for assessing guaranteed air quality, taking into account the random nature of pollutant concentrations.

Methods. Statistical and calculation of the integrated atmospheric pollution index (API).

Results. The research was conducted based on data from the Eco-City public monitoring station No. 1162 in the area of the Faculty of Chemistry of Uzhhorod National University, taking into account the climatic and orographic features of the territory. It was established that the main source of atmospheric air pollution is motor vehicles. A pronounced seasonality of changes in pollutant concentrations was revealed. Formaldehyde was

determined to be the main factor in exceeding the air pollution indices, while the KIZA values often corresponded to the level of "very high" pollution. The most critical indicators were recorded: for formaldehyde – throughout the year with maximum values in January and July; for fine dust PM2.5 and PM10 – in the winter period due to the influence of the heating season and unfavorable dispersion conditions; for nitrogen dioxide – in April, which is associated with transport load. The assessment of atmospheric air quality showed a systematic exceedance of the standards for formaldehyde throughout the year.

Conclusions. The results of the study indicate a tense environmental state of the atmospheric air in the study area and the need to strengthen control over pollutant emissions. Priority measures include optimizing transport flows, reducing emissions during the heating season, and improving local atmospheric air monitoring systems, especially regarding the control of formaldehyde sources.

KEYWORDS: *ambient air, atmospheric pollution index, pollutants, element concentrations, guaranteed quality*

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest regarding the publication of this manuscript. Furthermore, the authors have fully adhered to ethical norms, including avoiding plagiarism, data falsification, and duplicate publication.

Authors Contribution: authors have contributed equally to this work.

AI Statement

The work does not use artificial intelligence resources.

References

1. *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. (2021). World Health Organization. Retrieved from https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228?utm_source=chatgpt.com
2. Bashtannik, M. P., Zhemera, N. S., Kiptenko, Ye. M., & Kozlenko, T. V. (2024). State of atmospheric air pollution over the territory of Ukraine. *Scientific Works of UkrSRIHM*, *266*, 70–93. Retrieved from https://old.uhmi.org.ua/pub/np/266/Bashtannik_Zhemera_Kiptenko_Kozlenko_266.pdf
3. *Reform of air quality monitoring and management*. (2019). Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. Retrieved from https://mepr.gov.ua/diyalnist/reformy/kompleksnyj-monitoryng-dov-killya/
4. Adamenko, S. Y., Arkhypova, L. M., Adamenko, Y. O., Moskaliuk, N. M., Hlibovytska, N. I., & Chupa, V. M. (2024). Patterns of PM10 particles change in the atmospheric air of Ivano-Frankivsk city. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1415*(1), 012002. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1415/1/012002
5. Di, Q., Wang, Y., Zanobetti, A., Wang, Y., Koutrakis, P., Choirat, C., Dominici, F., & Schwartz, J. D. (2020). Air pollution and mortality in the Medicare population. *New England Journal of Medicine*, *376*(26), 2513–2522. https://doi.org/10.1056/NEJMoa1702747
6. *Global Burden of Disease Study (GBD): Air pollution*. University of Washington. (2024). Institute for Health Metrics and Evaluation. Retrieved from https://www.healthdata.org/research-analysis/health-topics/air-pollution?utm_source=chatgpt.com
7. Brauer, M., et al. (2024). Global burden and strength of evidence for 88 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2021. *The Lancet*. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(24)00933-4
8. Wu, Y., Wang, M., Lu, K., Zhang, Y., & Zhang, Y. (2023). Production and loss of atmospheric formaldehyde at a suburban site in northern China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *23*, 2997–3015. https://doi.org/10.5194/acp-23-2997-2023
9. Liu, S.-Q., Ma, H.-N., Tang, M.-X., Shao, Y.-M., Yao, T.-T., He, L.-Y., & Huang, X.-F. (2025). Decoding the primacy of transportation emissions of formaldehyde pollution in an urban atmosphere. *Toxics*, *13*(8), 643. https://doi.org/10.3390/toxics13080643
10. Manzueta, R., Kumar, P., Ariño, A. H., & Martín-Gómez, C. (2024). Strategies to reduce air pollution emissions from urban residential buildings. *Science of the Total Environment*, *947*, 175809. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175809
11. *On the Basic Principles (Strategy) of the State Environmental Policy of Ukraine for the Period up to 2030* (Law of Ukraine No. 2697-VIII). (2019). Verkhovna Rada of Ukraine.
12. *On Atmospheric Air Protection* (Law of Ukraine No. 2707-XII). (1992). Verkhovna Rada of Ukraine. Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12#Text

13. Arkhypova, L. M., Adamenko, S. Y., Adamenko, Y. O., Kachala, T. B., & Kachala, S. V. (2025). Modeling the dependence of ambient air pollution on meteorological factors: A case study from Ukraine. *Journal of Physics: Conference Series, 3153*(1), 012021. https://doi.org/10.1088/1742-6596/3153/1/012021
14. Bernacki J., Scherer R. (2025). A Comprehensive Review of Data-Driven Techniques for Air Pollution Concentration Forecasting. *Sensors (Basel)*, 25(19),6044. https://doi.org/10.3390/s25196044
15. Koltsov, M., & Shevchenko, L. (2020). *Air quality monitoring: Ukrainian and international experience: Analytical report*. Open Society Foundation. Retrieved from https://osf.org.ua/data/blog_dwnl/Analitichna_zapiska_atmosferne_povitrya.pdf
16. Soroka, M. L. (Ed.). (2022). *Radiation and Smog Alarm: Guidelines and principles for informing the public about air quality, radiation, and chemical hazards*. Arnika. Retrieved from https://cleanair.org.ua/wp-content/uploads/2023/01/cleanair.org.ua-uaqi-radiation-and-smog-alarm-presentation-soroka.pdf
17. Klymchuk, I., & Arkhypova, L. (2023). Research on climate change in the Carpathian Region: Consequences and challenges for ski resorts. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources, 14*(1), 66–74. https://doi.org/10.69628/esbur/2.2023.19
18. Matviichuk, V. K., Chuhaienko, Yu. O., & Savenkov, O. I. (2023). *Environmental policy in the system of public administration of the national economy*. National Academy of Management. Retrieved from https://nam.kyiv.ua/files/publications/978-966-8406-83-6-monog.pdf
19. *Some issues of state monitoring in the field of atmospheric air protection* (Resolution No. 827). (2019). Cabinet of Ministers of Ukraine. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/827-2019-%D0%BF#Text
20. Nekos, A. N., & Kravchenko, O. K. (2012). Assessment of the state and dynamics of atmospheric air pollution in small towns of Kharkiv region. *Man and Environment. Issues of Neoecology*, (1-2), 122–127. Retrieved from http://luddovk.univer.kharkov.ua/sites/default/files/Papers/19-12-17.pdf
21. Falko V. Assessment of guaranteed air quality for plants (case of the park named after T. Shevchenko in Dnipro). *Environmental Sciences*, 6(45), 153-157. Retrieved from https://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2022/6/24.pdf
22. Rybalova, O. V., Bielan, S. V., & Artemiev, S. R. (2023). Determination of the environmental risk of atmospheric air quality deterioration considering the chemical hazard of Ukrainian regions. *Problems of Emergency Situations, 18*, 196–209. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pns_2013_18_25

The article was received by the editors 16.04.2026 The article was revised 18.05.2026
The article is recommended for printing 21.05.2026 This article published 30.05.2026

https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-04
УДК 504.4.064:528.88:355.4

В. О. МАКСИМЕНКО,
аспірант кафедри екологічного моніторингу та заповідної справи
e-mail: maksymenko.vladyslav.o@gmail.com ORCID ID: https://orcid.org/0009-0001-5525-2438
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ SENTINEL-2 ДЛЯ КОМПЕНСАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ПОВЕРХНЕВИХ ВОД УКРАЇНИ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ

Мета. Наукове обґрунтування можливостей використання даних Sentinel-2 як компенсаційного компонента екологічного моніторингу поверхневих вод України в умовах воєнного стану.

Методи. Концептуально-аналітичний характер дослідження поєднує структурно-функціональний аналіз традиційної системи моніторингу поверхневих вод, порівняльну оцінку контактних і дистанційних методів спостереження, аналіз вимог Водної рамкової директиви ЄС, технічну інтерпретацію можливостей мультиспектрального сенсора Sentinel-2 MSI та демонстраційний аналіз супутникових сцен зони Каховського водосховища

Результати. . Для ілюстрації компенсаційного потенціалу дистанційного зондування Землі використано сцени Sentinel-2 L2A до та після руйнування Каховської греблі, зокрема візуалізації у режимі True color і розрахунок NDWI для виділення залишкових водних масивів та трансформованих руслових елементів. Визначено три основні виміри прогалини екологічних даних, що виникає в умовах війни: просторовий, часовий та аналітичний. Показано, що Sentinel-2 не замінює лабораторний контроль якості води, але може забезпечувати регулярний просторово-часовий скринінг великих водних об'єктів, оперативне виявлення змін водної поверхні, картографування зон затоплення або висихання, попередню індикацію каламутності та визначення ділянок для пріоритетної польової валідації. На прикладі Каховського водосховища продемонстровано, що супутникові сцени дозволяють фіксувати масштабну трансформацію водного об'єкта після втрати наземного доступу, зокрема спрацювання водосховища, оголення донних відкладів і формування залишкових водойм.

Висновки. Найбільш обґрунтованою для воєнного та повоєнного періодів є інтегрована модель моніторингу, у якій Sentinel-2 виконує функцію компенсаційного просторово-часового контуру, індексний аналіз забезпечує первинне виявлення змін, машинне навчання може підтримувати автоматизовану класифікацію сцен після належної валідації, а лабораторний контроль залишається основою метрологічно підтвердженої оцінки якості води.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *екологічний моніторинг, поверхневі води, Sentinel-2, дистанційне зондування Землі, воєнний стан, NDWI*

Як цитувати: Максименко В. О. Використання даних Sentinel-2 для компенсаційного моніторингу поверхневих вод України в умовах воєнного стану. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2026. Вип. 34. С. 54-65. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-04

In cites: Maksymenko, V. O. (2026). Use of Sentinel-2 data for compensatory monitoring of surface waters of Ukraine under martial law. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology,* (34), 54-65. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-04 (in Ukrainian)

Вступ

Систематичний моніторинг поверхневих вод є базовою передумовою екологічної безпеки, раціонального водокористування, захисту здоров'я населення та виконання міжнародних природоохоронних зобов'язань. Результати такого моніторингу використовуються для оцінювання екологічного і хімічного стану водних масивів, виявлення джерел забруднення, планування природоохоронних заходів, управління ризиками водопостачання та підготовки державної звітності. У Водній рамковій директиві ЄС 2000/60/ЄС регулярний

© Максименко О. В., 2026
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0

моніторинг розглядається як один із ключових інструментів запобігання подальшому погіршенню стану водних екосистем [1], а у настановах ВООЗ контроль водних джерел є складником системи управління ризиками для здоров'я населення [2].

В Україні традиційна система моніторингу поверхневих вод значною мірою спирається на стаціонарні пункти спостереження, польовий відбір проб, транспортування зразків і лабораторний аналіз. Такий підхід забезпечує високу доказовість для окремих фізико-хімічних, гідробіологічних і токсикологічних показників, однак критично залежить від безпечного доступу до контрольних створів, працездатності лабораторій, транспортної логістики, наявності персоналу та стабільних каналів передавання даних. У мирних умовах ця залежність є прийнятною, оскільки вона компенсується регулярністю польових робіт і контрольованістю процедур. Водночас нормативною основою водного моніторингу в Україні залишається Водний кодекс України, який визначає правові засади використання, охорони та відтворення водних ресурсів [3]. В умовах повномасштабної війни залежність моніторингової системи від безпечного наземного доступу перетворюється на системну вразливість.

Після початку повномасштабної збройної агресії проти України значна частина територій опинилася у зоні бойових дій, тимчасової окупації або підвищеної мінної небезпеки. Для системи екологічного моніторингу це означає не лише зменшення кількості вимірювань, а й розрив у всьому ланцюзі формування екологічних даних: від доступу до пункту спостереження до лабораторного підтвердження результатів. У документах UNECE щодо оцінювання екологічних збитків в Україні підкреслено, що супутникові спостереження особливо важливі в ситуаціях, коли наземне обстеження є небезпечним або неможливим [4].

Руйнування Каховської ГЕС 6 червня 2023 року стало граничним прикладом ситуації, у якій виключно наземна модель моніторингу не могла забезпечити оперативне, безпечне і просторово повне спостереження. Катастрофа спричинила різке спрацювання водосховища, затоплення територій нижче за течією, оголення великих площ донних відкладів, зміну гідрологічного режиму нижнього Дніпра та переміщення завислих речовин і забруднювачів [5–8]. Окремі дослідження також показали біогеохімічну реакцію північно-західної частини Чорного моря на надходження водних і завислих мас після руйнування греблі [9].

Дистанційне зондування Землі створює додатковий інформаційний контур, який не потребує фізичного доступу до території спостереження. Місія Sentinel-2 програми Copernicus забезпечує регулярне отримання мультиспектральних зображень, придатних для аналізу водної поверхні, берегової лінії, зон затоплення, каламутних шлейфів, оголених донних відкладів і непрямих ознак евтрофікації [10–12]. Водночас супутникові дані не є повним еквівалентом лабораторного моніторингу: вони не визначають безпосередньо концентрації важких металів, хлорорганічних сполук, нітратів або мікробіологічних показників [13–15].

Наукове значення роботи полягає в узагальненні можливостей застосування даних Sentinel-2 для просторово-часового моніторингу поверхневих вод за умов обмеженого або втраченого доступу до наземних пунктів спостереження. Запропоновано підхід до поєднання даних ДЗЗ, індексного аналізу, методів машинного навчання та лабораторного контролю з розмежуванням їхніх функцій у системі моніторингу. Супутникові дані можуть забезпечувати просторовий скринінг і виявлення змін, спектральні індекси – підтримувати первинну інтерпретацію стану водних об'єктів, машинне навчання – використовуватися для автоматизованої класифікації сцен після навчання й валідації, тоді як лабораторні дослідження залишаються необхідними для підтвердження показників якості води.

Практичне значення роботи пов'язане з можливістю використання відкритих супутникових даних для попереднього оцінювання змін стану поверхневих вод за умов обмеженого доступу до окремих територій. Такий підхід може доповнювати традиційні спостереження, сприяти плануванню польових обстежень, підготовці картографічних матеріалів і формуванню аналітичної інформації для потреб екологічного управління.

Метою дослідження є обґрунтування можливостей використання даних Sentinel-2 як компенсаційного компонента екологічного моніторингу поверхневих вод України в умовах воєнного стану та демонстрація їх застосування на прикладі супутникових сцен зони Каховського водосховища до і після руйнування греблі.

Об’єкти та методи дослідження

Об’єктом дослідження є система екологічного моніторингу поверхневих вод України в умовах обмеженого або втраченого наземного доступу, зокрема, водні об’єкти Дніпровського басейну, що зазнали впливу бойових дій, окупації територій, мінної небезпеки та руйнування гідротехнічної інфраструктури.

Предметом дослідження є можливості використання супутникових даних Sentinel-2 для підтримки просторово-часового спостереження за поверхневими водами, виявлення змін водної поверхні, індикації зон підвищеної каламутності та формування компенсаційного інформаційного контуру в умовах, коли регулярні наземні спостереження є неможливими або істотно обмеженими.

Дослідження орієнтоване на обґрунтування підходу до інтеграції відкритих супутникових даних, індексного аналізу та аналітичної інтерпретації в систему спостереження за поверхневими водами. Використані супутникові сцени розглядаються як приклад практичного застосування такого підходу для територій, де регулярне наземне спостереження ускладнене. У межах роботи дані ДЗЗ трактуються насамперед як засіб просторового скринінгу, попереднього виявлення змін і визначення ділянок, що потребують подальшої уваги. Така інтерпретація дозволяє коректно поєднувати дистанційні індикатори з традиційними методами екологічного контролю, не ототожнюючи спектральні показники з лабораторними характеристиками якості води.

Дослідження побудовано на поєднанні кількох аналітичних напрямів: розгляду структури та функцій традиційної системи моніторингу поверхневих вод, порівняння контактного і дистанційного підходів, аналізу вимог Водної рамкової директиви ЄС та української нормативної бази, а також оцінювання можливостей Sentinel-2 MSI для спостереження за водними об’єктами. Для ілюстрації запропонованого підходу використано супутникові сцени зони Каховського водосховища. Узагальнення цих складників дало змогу окреслити схему поєднання ДЗЗ, індексного аналізу, машинного навчання та контрольованої аналітичної звітності.

Технічна оцінка Sentinel-2 ґрунтувалася на офіційних характеристиках ESA і Copernicus Data Space Ecosystem. Сенсор MSI реєструє дані у 13 спектральних каналах у діапазоні 443–2190 нм, має смугу зйомки 290 км, просторову роздільну здатність 10, 20 і 60 м залежно від каналу та п’ятиденну повторюваність для двосупутникової конфігурації [10, 11]. Для водного моніторингу найбільш релевантними є канали видимого спектра, ближнього інфрачервоного діапазону, Red Edge та SWIR, які можуть використовуватися для розмежування води й суходолу, аналізу завислих речовин, індикації потенційної евтрофікації та картографування змін берегової лінії [12–17].

Як базові індикатори розглянуто NDWI, NDTI і NDCI. NDWI розраховується за співвідношенням зеленого та ближнього інфрачервоного каналів і використовується для виділення відкритої водної поверхні [18]. Його модифікація MNDWI може застосовуватися для підсилення водних об’єктів у забудованих або спектрально складних умовах [19]. У цій роботі базовим індексом для демонстраційного кейсу обрано NDWI:

$$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR).$$

Для Sentinel-2 у типовій реалізації NDWI може бути розрахований із використанням каналу B3 як Green та B8 як NIR. NDTI використовується для оцінювання відносної просторової мінливості каламутності за червоним і зеленим каналами [17, 20]:

$$NDTI = (Red - Green) / (Red + Green).$$

NDCI застосовується як непрямий індикатор хлорофілу-а та потенційних евтрофікаційних процесів з використанням червоного та Red Edge каналів [16, 21]:

$$NDCI = (Red\ Edge - Red) / (Red\ Edge + Red).$$

Для демонстраційного кейсу використано сцени Sentinel-2 L2A зони Каховського водосховища, отримані через Copernicus Browser: сцену до руйнування греблі від 25.05.2023 та сцену після руйнування від 25.06.2023. Візуальний аналіз виконано у режимі True color для якісного зіставлення стану водного дзеркала до і після події. Для післяаварійної сцени також використано NDWI-візуалізацію, що дозволяє контрастно виділити залишкові водні масиви, заболочені ділянки та нові руслові елементи. Зазначені сцени застосовано як ілюстративний приклад

просторової трансформації водного об'єкта, а не як повну кількісну оцінку площі водної поверхні або хімічного стану води.

Концептуальне моделювання інтегрованої системи виконано з урахуванням трьох рівнів: супутникового, аналітичного та звітного. Супутниковий рівень забезпечує отримання і попередню обробку Sentinel-2; аналітичний рівень виконує індексний аналіз і потенційну класифікацію сцен; звітний рівень формує структуровану інтерпретацію з посиланням на джерела. Vision Transformer розглянуто як перспективну архітектуру для класифікації мультиспектральних сцен [22, 23], а Retrieval-Augmented Generation — як інструмент контрольованого формування звітів із прив'язкою до джерел, а не як засіб валідації екологічних вимірювань [24].

Результати та обговорення

Аналіз функціональної структури наземного моніторингу показує, що його стійкість визначається не лише наявністю пунктів спостереження, а й безперервністю всього операційного ланцюга: доступ до створу, відбір проб, транспортування, лабораторний аналіз, контроль якості, передавання та інтерпретація даних. Порушення будь-якого з цих елементів знижує придатність результатів для управлінських рішень.

В умовах війни формується не одинична відсутність даних, а системна прогалина. Просторовий вимір полягає у втраті регулярного контролю над частиною водних об'єктів, зокрема на окупованих, прифронтових або замінованих територіях. Часовий вимір проявляється у неможливості забезпечити достатню частоту спостережень для швидкоплинних процесів, таких як аварійні скиди, паводки, формування каламутних шлейфів або різкі зміни водності. Аналітичний вимір пов'язаний із дефіцитом лабораторно підтверджених показників, необхідних для оцінювання хімічного, токсикологічного і біологічного стану вод.

Саме поєднання цих трьох вимірів створює потребу у компенсаційному контурі моніторингу. Дані ДЗЗ не усувають аналітичну прогалину повністю, оскільки не замінюють лабораторні вимірювання, але суттєво зменшують просторову і часову невизначеність. Це особливо важливо для великих водних об'єктів, водосховищ, заплавних територій і прибережних зон, де наземний контроль є точковим і не завжди репрезентує просторову неоднорідність стану водної поверхні.

Перевага Sentinel-2 у кризових умовах полягає у незалежності від фізичного доступу до берегової лінії та можливості аналізувати не окрему точку, а всю водну поверхню в межах сцени. Це дозволяє виявляти просторову неоднорідність, яку неможливо зафіксувати лише точковими польовими вимірюваннями.

Sentinel-2 є особливо придатним для завдань, де потрібна регулярна просторова інформація: зміна площі водного дзеркала, формування нових руслових елементів, поява оголених донних відкладів, поширення каламутних шлейфів, динаміка прибережної рослинності та розвиток потенційних евтрофікаційних процесів [13–17]. Для кризового моніторингу принципово важливо розмежовувати дві функції супутникових даних. Перша функція є доказовою для просторових змін водної поверхні, якщо забезпечено коректну попередню обробку і порівнянність сцен. Друга функція є індикативною для якості води, оскільки індекси каламутності та хлорофілу потребують калібрації за наземними даними.

Узагальнення відповідності можливостей Sentinel-2 основним завданням кризового моніторингу поверхневих вод наведено в таблиці 1.

Каховська катастрофа є релевантним прикладом для демонстрації компенсаційної ролі Sentinel-2, оскільки масштаб змін значно перевищував можливості оперативного наземного обстеження. Після руйнування греблі відбулися швидке спрацювання водосховища, експозиція донних відкладів, трансформація руслового ландшафту і зміни умов існування прибережних екосистем [7, 8]. Подібний підхід до картографування просторово-часових трансформацій ложа колишнього Каховського водосховища за даними Sentinel-2 уже застосовано у спеціалізованому дослідженні українських авторів [25].

Зіставлення мультиспектральних сцен до і після 6 червня 2023 року дає змогу візуально ідентифікувати масштабну зміну водного дзеркала. На сцені Sentinel-2 L2A від 25.05.2023 водосховище ще зберігає суцільну водну поверхню (рис. 1).

На сцені від 25.06.2023 фіксується майже повне спрацювання водосховища, оголення значних площ донних відкладів, поява залиш-

Таблиця 1

Відповідність можливостей Sentinel-2 завданням кризового моніторингу поверхневих вод

Table 1

Correspondence between Sentinel-2 capabilities and emergency surface water monitoring tasks

Завдання моніторингу	Придатність Sentinel-2	Основні індикатори	Ключове обмеження
Картографування водної поверхні та зон затоплення	Висока	NDWI, MNDWI, водна маска	Хмарність, тіні, мілководдя, змішані пікселі
Виявлення висихання або спрацювання водосховищ	Висока	Різницеві карти NDWI, часові ряди	Потрібні коректна межа AOI та порівнянні умови зйомки
Оцінювання відносної каламутності	Середня-висока	NDTI, червоний і Red Edge канали	Необхідна калібрація за польовими вимірюваннями
Індикація потенційної евтрофікації / chlorophyll-a	Середня	NDCI, Red Edge канали	Змішування сигналу хлорофілу, завислих речовин і донного відбиття
Виявлення важких металів, нітратів, токсичних органічних сполук	Низька / непряма	Оптичні аномалії лише як допоміжна ознака	Потрібен лабораторний аналіз
Формування управлінських звітів	Висока як інформаційна підтримка	Карти, часові ряди, джерельно прив'язані звіти	Звітність не є метрологічною валідацією даних



Рис. 1 – Sentinel-2 L2A, зона Каховського водосховища до руйнування греблі, 25.05.2023, режим True color. Джерело: Copernicus Browser

Fig. 1 – Sentinel-2 L2A, Kakhovka Reservoir area before dam destruction, 25 May 2023, True color mode. Source: Copernicus Browser

кових водойм і формування нового руслового ландшафту (Рис. 2). Таке зіставлення демонструє цінність супутникових даних саме як оперативного компенсаційного джерела просторо-вої інформації за умов, коли безпечний наземний доступ до значної частини території відсутній.

Додаткову інтерпретаційну цінність має NDWI-візуалізація після аварійної сцени (рис. 3). NDWI контрастне виділяє водну поверхню на фоні суходолу, що дозволяє локалізувати залишкові водні масиви, заболочені ділянки та нові руслові елементи. У кризовому моніторингу така інформація може бути використана



Рис. 2 – Sentinel-2 L2A, зона Каховського водосховища після руйнування греблі, 25.06.2023, режим True color. Джерело: Copernicus Browser

Fig. 2 – Sentinel-2 L2A, Kakhovka Reservoir area after dam destruction, 25 June 2023, True color mode. Source: Copernicus Browser

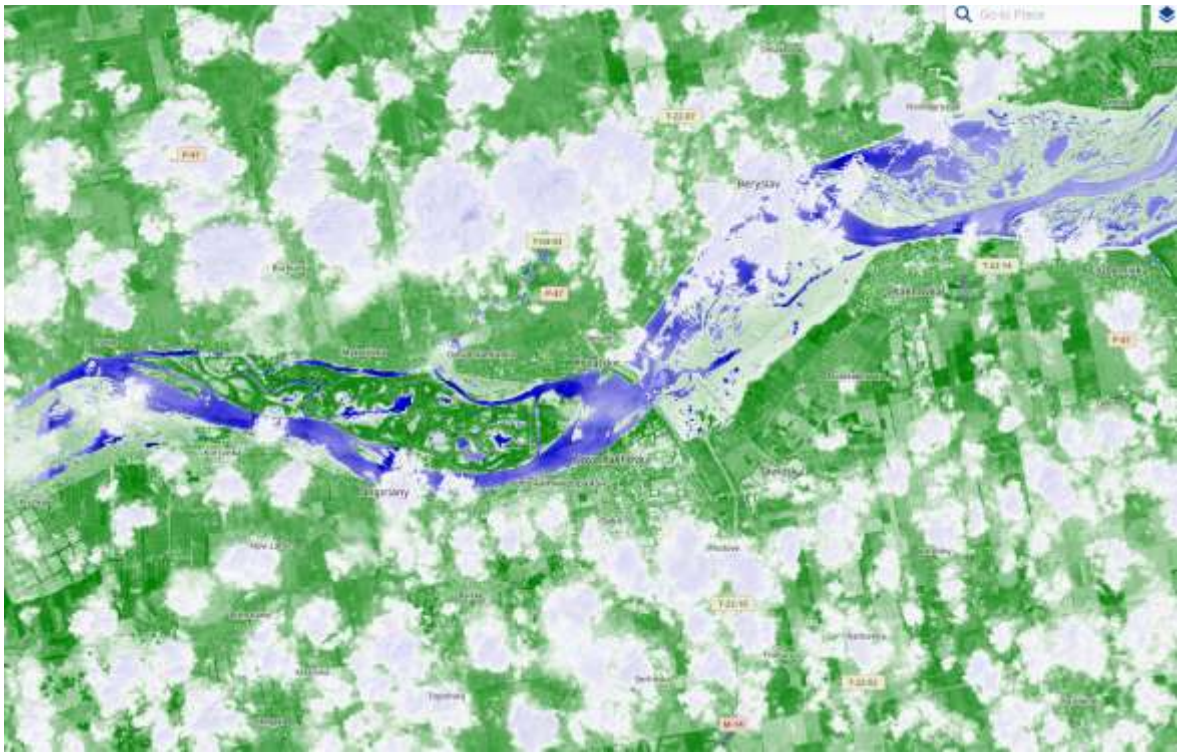


Рис. 3 – Візуалізація NDWI зони Каховського водосховища після руйнування греблі, 25.06.2023. Джерело: Copernicus Browser

Fig. 3 – NDWI visualization of the Kakhovka Reservoir area after dam destruction, 25 June 2023. Source: Copernicus Browser

для попередньої пріоритизації ділянок польового обстеження, планування відбору проб і зіставлення з офіційними або лабораторними даними, якщо вони стають доступними.

Водночас наведений кейс не слід трактувати як повну екологічну оцінку наслідків катастрофи. Сцени Sentinel-2 дозволяють фіксувати просторову трансформацію водного об'єкта, але для оцінювання вторинного забруднення, вивільнення металів, токсичних органічних сполук, біогенних елементів і мікробіологічних ризиків потрібне поєднання супутникових даних із лабораторними дослідженнями води та донних відкладів, гідрологічним моделюванням і офіційними даними моніторингу [8, 9]. Саме тому Sentinel-2 у запропонованій моделі розглядається не як заміна наземного контролю, а як компенсаційний просторово-часовий контур, який допомагає зменшити невизначеність у період обмеженого доступу.

Індексний аналіз є одним із найпростіших і найбільш відтворюваних способів отримання первинної інформації із супутникових сцен. Його перевага полягає у прозорості обчислень, можливості порівняння дат і просторовій інтерпретованості результатів. Для кризового моніторингу поверхневих вод доцільно розглядати індекси не як самодостатні екологічні показники, а як інструменти попереднього виявлення змін.

NDWI є найбільш релевантним для виділення водної поверхні, визначення залишкових водойм, зон затоплення або висихання. У випадку Каховського водосховища він дозволяє відокремити залишкові водні масиви від оголених донних відкладів і суходолу. NDTI може використовуватися для просторового скринінгу відносної каламутності, зокрема у випадках переміщення завислих речовин після паводків, руйнування гідротехнічних споруд або аварійних скидів. NDCI доцільно застосовувати для попередньої індикації потенційної евтрофікації, однак його інтерпретація є складнішою через можливе змішування сигналів хлорофілу-a, завислих речовин, кольорової розчиненої органічної речовини та донного відбиття на мілководдях.

Отже, у компенсаційному контурі моніторингу індекси виконують функцію просторового фільтра ризику. Вони дозволяють визначити ділянки, які потребують пріоритетної уваги, але не дають підстав для остаточних висновків про хімічну або токсикологічну якість води без лабораторної валідації.

Машинне навчання може підвищити ефективність обробки великих масивів супутникових даних, але його застосування потребує чітко визначеної навчальної вибірки, експертної розмітки, незалежної валідації та порівняння з базовими алгоритмами. У межах запропонованої системи Vision Transformer розглядається як перспективний інструмент сегментації мультиспектральних сцен, а не як уже верифікована модель для всіх водних об'єктів України [22, 23].

Потенційні класи сегментації можуть включати відкриту воду, каламутну воду, вологі донні відклади, суходіл, прибережну рослинність, хмарність і тіні. Практичне застосування такої моделі потребує формування репрезентативного набору сцен для різних сезонів, типів водойм, гідрологічних умов і регіонів України. Обов'язковими є метрики точності, зокрема overall accuracy, F1-score, intersection over union для класів водної поверхні та перевірка переносимості моделі на нові ділянки.

Retrieval-Augmented Generation доцільно використовувати не для первинного визначення екологічного стану, а для контрольованого формування звітів. RAG-модуль може зв'язувати карти, індекси, часові ряди, нормативні документи та наукові джерела, зменшуючи ризик непідтверджених текстових узагальнень [24]. Водночас він не замінює валідацію супутникових продуктів і не підвищує метрологічну точність самих вимірювань. Його функція полягає у прозорому документуванні, відтворюваній логіці посилань і підтримці підготовки управлінських матеріалів.

Концептуальну архітектуру інтегрованої системи дистанційного моніторингу поверхневих вод подано на рис. 4.

Запропонований підхід має практичне значення для кількох рівнів екологічного управління. На оперативному рівні Sentinel-2 може використовуватися для швидкого виявлення масштабних змін водної поверхні, затоплення, висихання, формування каламутних шлейфів і зміни берегової лінії. На тактичному рівні індексні карти можуть допомагати пріоритизувати польові обстеження та визначати ділянки, де відбір проб матиме найбільшу інформаційну цінність. На стратегічному рівні часові ряди супутникових даних можуть підтримувати відновлення системи моніторингу у повоєнний період, коли наземна інфраструктура ще не буде повністю відновлена.

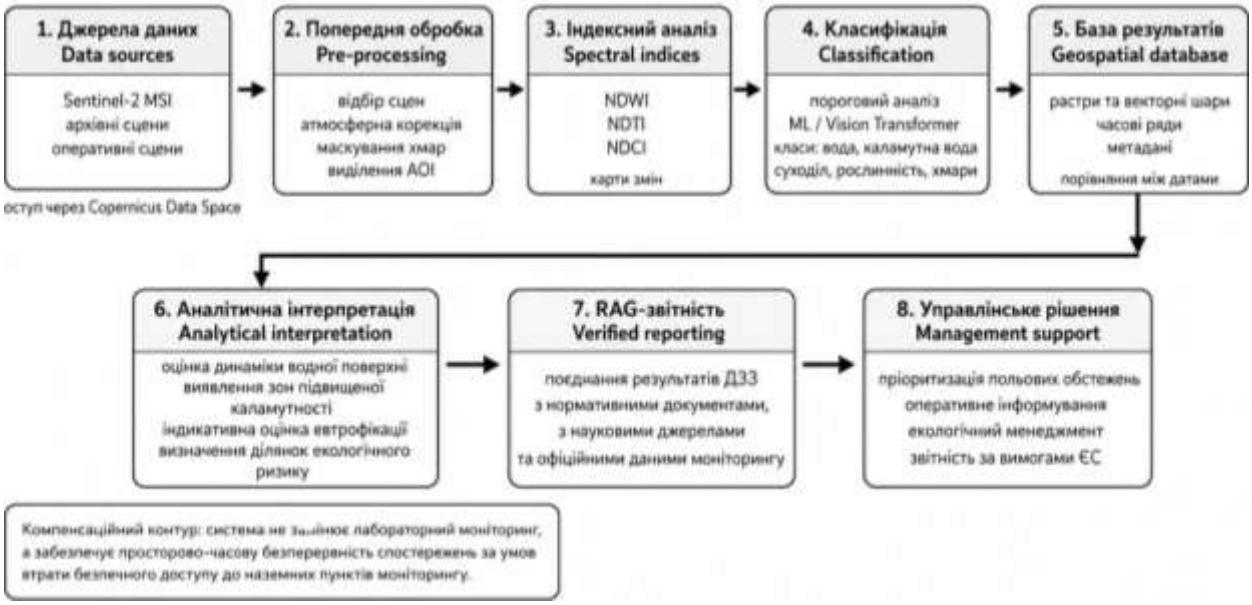


Рис. 4 – Схема інтегрованої системи компенсаційного моніторингу поверхневих вод на основі Sentinel-2, індексного аналізу, машинного навчання та контрольованої звітності

Fig. 4 – Scheme of the integrated compensatory surface water monitoring system based on Sentinel-2, spectral index analysis, machine learning and controlled reporting

Важливо, що компенсаційний контур не повинен протиставлятися традиційному лабораторному моніторингу. Навпаки, найбільш ефективною є інтегрована модель, у якій супутникові дані забезпечують просторову повноту і регулярність спостережень, а лабораторні вимірювання забезпечують метрологічну достовірність і нормативну інтерпретацію якості води. Такий підхід відповідає сучасній логіці екологічного моніторингу, де різні джерела даних не замінюють, а доповнюють одне одного.

Умови інтерпретації та подальшого уточнення результатів

Інтерпретація супутникових даних потребує врахування умов знімання та спектральних властивостей досліджуваних поверхонь. По-перше, Для Sentinel-2 важливими є хмарність, наявність диму або серпанку, кут освітлення, стан атмосфери, хвилювання водної поверхні та сезонна динаміка рослинності. У ситуаціях, коли оптичні знімки мають недостатню придатність через хмарність, доцільним є залучення радіолокаційних даних Sentinel-1, які можуть доповнювати оптичні спостереження під час кризового картографування [4, 26].

По-друге, NDWI, NDTI і NDCI є спектральними індикаторами, а не прямими лабораторними вимірюваннями. Вони дозволяють виявляти просторові аномалії та пріоритетні ділянки, однак для кількісного визначення концентрацій речовин потребують калібрації і незалежної перевірки [13–17].

По-третє, Sentinel-2 не дає прямої інформації про важкі метали, нафтопродукти, мікробіологічні показники або токсичні органічні сполуки. Для таких параметрів супутниковий аналіз може виконувати лише функцію просторової пріоритизації, тоді як остаточні висновки мають ґрунтуватися на лабораторному контролі. Загальноєвропейські оцінки стану поверхневих вод також підтверджують, що навіть за наявності розвинених систем моніторингу досягнення доброго екологічного стану водних масивів залишається складним управлінським завданням [27].

По-четверте, застосування моделей машинного навчання потребує окремої процедури навчання і валідації. Без опису датасету, розмітки, метрик точності та порівняння з базовими алгоритмами такі моделі мають розглядатися як перспективний елемент архітектури, а не як доведений емпіричний результат.

По-п’яте, результати аналізу Каховського водосховища доцільно розглядати відповідно до мети цієї роботи – як основу для просторового простеження трансформації водного об’єкта та змін поверхневого покриву за

даними Sentinel-2. Детальне оцінювання площі водної поверхні, об'єму води, складу донних відкладів або концентрацій забруднювачів є окремим напрямом досліджень і потребує спеціалізованих розрахункових процедур, гідрологічного моделювання та лабораторного контролю.

Висновки

Повномасштабна війна спричинила системне порушення наземного екологічного моніторингу поверхневих вод України. Ключовими чинниками є втрата безпечного доступу до пунктів спостереження, пошкодження інфраструктури, мінна небезпека, порушення логістики польових робіт і обмеження лабораторного контролю.

Прогалина екологічних даних має просторовий, часовий та аналітичний виміри. Саме їх поєднання створює потребу у компенсаційному контурі моніторингу, здатному підтримувати регулярне спостереження без фізичної присутності оператора на місці.

Sentinel-2 є обґрунтованим джерелом компенсаційної просторово-часової інформації для кризового моніторингу поверхневих вод. Його головна роль полягає у картографуванні водної поверхні, виявленні змін берегової лінії, зон затоплення або висихання, попередній індикації каламутності та визначенні ділянок для подальшої польової перевірки.

На прикладі Каховського водосховища показано, що сцени Sentinel-2 L2A до і після руйнування греблі дозволяють фіксувати масштабну трансформацію водного об'єкта: спрацювання водосховища, оголення донних відкладів, формування залишкових водойм і нових руслових елементів. NDWI-візуалізація підсилює інтерпретацію таких змін завдяки контрастному виділенню водної поверхні.

NDWI, NDTI і NDCI доцільно використовувати як інструменти первинного скринінгу, а не як заміну лабораторних показників. Для переходу від спектральних індикаторів до кількісних концентрацій речовин потрібні польові вимірювання, калібрація і незалежна валідація.

Інтелектуальна аналітика має допоміжну, а не замінну функцію. Vision Transformer може використовуватися для автоматизованої сегментації сцен після належного навчання і валідації, а RAG – для контрольованого формування звітів із прив'язкою до джерел, але не для валідації екологічних вимірювань.

Найбільш перспективною для України є інтегрована модель моніторингу, у якій ДЗЗ забезпечує просторово-часовий скринінг і раннє виявлення змін, машинне навчання підтримує обробку великих масивів даних, контрольована звітність забезпечує прозоре документування, а наземний лабораторний контроль залишається основою метрологічно підтвердженої оцінки якості вод.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису немає. Автор повністю дотримувався етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Декларація про використання ШІ

Під час підготовки рукопису використано інструменти генеративного штучного інтелекту ChatGPT-5.5 (OpenAI, 2026) для мовного редагування та структурування окремих фрагментів. Штучний інтелект не використовувався для створення первинних наукових даних, лабораторних результатів або неперевірених емпіричних висновків. Автор перевірив фактичні твердження, джерела та висновки і несе повну відповідальність за зміст рукопису.

Список використаної літератури

1. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of water policy. Official Journal of the European Communities. 2000. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CElex:32000L0060
2. WHO Guidelines for drinking-water quality. 4th edition, incorporating the 1st and 2nd addenda. Geneva: World Health Organization, 2022. URL: https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064
3. Водний кодекс України від 06.06.1995 № 213/95-ВР. Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-вр
4. Policy and technical brief on use of Earth observations to assess ecosystems damage in Ukraine. UNECE. 2024. URL: https://unece.org/sites/default/files/2024-

05/Policy%20and%20technical%20brief%20on%20use%20of%20Earth%20observations%20to%20assess%20ecosystems%20damage%20in%20Ukraine.pdf
5. Екологічні наслідки руйнування Каховської греблі під час війни в Україні. Національна академія наук України. URL: https://www.nas.gov.ua/news/kahovska-katastrofa-matime-viddaleni-ekologichni-naslidki
6. Широкомасштабне забруднення, засмічення та опріснення Чорного моря. *RAC/SPA.* 2024. URL: https://rac.org.ua/wp-content/uploads/2024/06/racse-kahovka-resume-ukr-2024.pdf
7. Spears B. M., Harpham Q., Brown E. et al. A rapid environmental risk assessment of the Kakhovka Dam breach during the Ukraine conflict. *Nature Ecology & Evolution.* 2024. Vol. 8. P. 834–836. https://doi.org/10.1038/s41559-024-02373-0
8. Shumilova O. et al. Environmental effects of the Kakhovka Dam destruction by warfare in Ukraine. *Science.* 2025. Vol. 387. P. 1181–1186. https://doi.org/10.1126/science.adn8655
9. Jiang D., Khokhlov V., Tuchkovenko Y. et al. The biogeochemical response of the north-western Black Sea to the Kakhovka Dam breach. *Communications Earth & Environment.* 2025. Vol. 6. Article 185. https://doi.org/10.1038/s43247-025-02153-z
10. Sentinel-2. European Space Agency. URL: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2
11. Sentinel-2 Documentation. Copernicus Data Space Ecosystem. URL: https://documentation.dataspace.copernicus.eu/Data/SentinelMissions/Sentinel2.html
12. Drusch M., Del Bello U., Carlier S. et al. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment.* 2012. Vol. 120. P. 25–36. https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.01.014
13. Gholizadeh M. H., Melesse A. M., Reddi L. A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques. *Sensors.* 2016. Vol. 16, Iss. 8. Article 1298. https://doi.org/10.3390/s16081298
14. Goodrich S., Schaeffer B., Meyers K. et al. Sentinel-2 for chlorophyll-a water quality monitoring: A review of validation evidence and application potential. *International Journal of Remote Sensing.* 2026. https://doi.org/10.1080/01431161.2026.2637851
15. Tian S., Guo H., Xu W. et al. Remote sensing retrieval of inland water quality parameters using Sentinel-2 and multiple machine learning algorithms. *Environmental Science and Pollution Research.* 2023. Vol. 30. P. 18617–18630. https://doi.org/10.1007/s11356-022-23431-9
16. Toming K., Kutser T., Laas A., Sepp M., Paavel B., Nõges T. First experiences in mapping lake water quality parameters with Sentinel-2 MSI imagery. *Remote Sensing.* 2016. Vol. 8, Iss. 8. Article 640. https://doi.org/10.3390/rs8080640
17. Chowdhury M., Vilas C., van Bergeijk S., Navarro G., Laiz I., Caballero I. Monitoring turbidity in a highly variable estuary using Sentinel 2-A/B for ecosystem management applications. *Frontiers in Marine Science.* 2023. Vol. 10. Article 1186441. https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1186441
18. McFeeters S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*. 1996. Vol. 17, Iss. 7. P. 1425–1432. https://doi.org/10.1080/01431169608948714
19. Xu H. Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 2006. Vol. 27, Iss. 14. P. 3025–3033. https://doi.org/10.1080/01431160600589179
20. Bid S., Siddique G. Identification of seasonal variation of water turbidity using NDTI method in Panchet Hill Dam, India. *Modeling Earth Systems and Environment.* 2019. Vol. 5. P. 1179–1200. https://doi.org/10.1007/s40808-019-00609-8
21. Mishra S., Mishra D. R. Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. *Remote Sensing of Environment.* 2012. Vol. 117. P. 394–406. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.016
22. Dosovitskiy A., Beyer L., Kolesnikov A. et al. An Image is Worth 16x16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale. *ICLR 2021*. URL: https://arxiv.org/abs/2010.11929
23. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N. et al. Attention is All You Need. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2017. Vol. 30. URL: https://arxiv.org/abs/1706.03762
24. Lewis P., Perez E., Piktus A. et al. Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2020. Vol. 33. P. 9459–9474. URL: https://arxiv.org/abs/2005.11401
25. Lischenko L., Kozlova A., Andreiev A. Mapping of the spatiotemporal transformations of the former Kakhovka reservoir bed after dam destruction using Sentinel-2 satellite imagery. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*. 2025. Vol. 12, Iss. 4. P. 29–37. https://doi.org/10.36023/ujrs.2025.12.4.296
26. Copernicus Emergency Management Service. European Union. URL: https://emergency.copernicus.eu/
27. European waters — Assessment of status and pressures 2021. European Environment Agency. 2021. URL: https://www.eea.europa.eu/publications/european-waters-assessment-2021

Стаття надійшла до редакції 11.04.2026 Переглянуто 10.05.2026
Стаття рекомендована до друку 15.05.2026 Опубліковано 30.05.2026

V. O. MAKSYMENKO,
PhD Student at the Department of Environmental Monitoring
and Protected Area Management
e-mail: maksymenko.vladyslav.o@gmail.com ORCID ID: https://orcid.org/0009-0001-5525-2438
V. N. Karazin Kharkiv National University
4 Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

USE OF SENTINEL-2 DATA FOR COMPENSATORY MONITORING OF SURFACE WATERS OF UKRAINE UNDER MARTIAL LAW

Purpose. To substantiate the use of Sentinel-2 data as a compensatory component of surface water environmental monitoring in Ukraine under martial law.

Methods. The study has a conceptual and analytical design and combines structural-functional analysis of the traditional surface water monitoring system, comparative assessment of contact-based and satellite-based observation methods, analysis of the EU Water Framework Directive, technical interpretation of Sentinel-2 MSI capabilities and a demonstration analysis of satellite scenes of the Kakhovka Reservoir area.

Results. Sentinel-2 L2A scenes acquired before and after the destruction of the Kakhovka Dam were used to illustrate the compensatory potential of Earth observation, including True color visualizations and NDWI mapping for the identification of residual water bodies and transformed channel elements. Three main dimensions of the wartime environmental data gap were identified: spatial, temporal and analytical. Sentinel-2 cannot replace laboratory water quality monitoring, but it can support regular spatial-temporal screening of large water bodies, operational detection of water surface changes, mapping of flooding or drying areas, preliminary indication of turbidity-related anomalies and prioritization of sites for field validation. The Kakhovka Reservoir case demonstrates that satellite scenes make it possible to document large-scale transformation of a water body after the loss of safe ground access, including reservoir drawdown, exposure of bottom sediments and formation of residual water bodies.

Conclusions. The most scientifically justified model for wartime and post-war conditions is an integrated monitoring system in which Sentinel-2 acts as a compensatory spatial-temporal observation contour, spectral index analysis provides primary change detection, machine learning may support automated classification of scenes after proper validation, and laboratory monitoring remains the basis for metrologically confirmed water quality assessment.

KEYWORDS: *environmental monitoring, surface waters, Sentinel-2, Earth observation, martial law, NDWI*

Conflict of Interest

The author declares no conflict of interest regarding the publication of this manuscript. Furthermore, the author has fully adhered to ethical norms, including avoiding plagiarism, data falsification, and duplicate publication.

AI Statement

Generative artificial intelligence tools ChatGPT-5.5 (OpenAI, 2026) were used to edit and structure the manuscript. Artificial intelligence was not used to generate primary scientific data, laboratory results, or unverified empirical conclusions. The author has verified the factual statements, sources, and conclusions and bears full responsibility for the content of the manuscript.

References

1. European Parliament & Council of the European Union. (2000). Directive 2000/60/EC establishing a framework for Community action in the field of water policy. Retrieved from https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CElex:32000L0060
2. World Health Organization. (2022). Guidelines for drinking-water quality (4th ed., incorporating the 1st and 2nd addenda). Retrieved from https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064
3. Verkhovna Rada of Ukraine. (1995). Water Code of Ukraine. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-вр Retrieved from (in Ukrainian)
4. United Nations Economic Commission for Europe. (2024). Policy and technical brief on use of Earth observations to assess ecosystems damage in Ukraine. Retrieved from https://unece.org/sites/default/files/2024-05/Policy%20and%20technical%20brief%20on%20use%20of%20Earth%20observations%20to%20assess%20ecosystems%20damage%20in%20Ukraine.pdf
5. National Academy of Sciences of Ukraine. (2023). Ecological consequences of the destruction of the Kakhovka dam during the war in Ukraine. Retrieved from https://www.nas.gov.ua/news/kahovska-katastrofa-matime-viddaleni-ekologichni-naslidki (in Ukrainian)

6. Regional Activity Centre for Specially Protected Areas. (2024). Large-scale pollution, littering and desalination of the Black Sea. Retrieved from https://rac.org.ua/wp-content/uploads/2024/06/racse-kahovka-resume-ukr-2024.pdf (in Ukrainian)
7. Spears, B. M., Harpham, Q., Brown, E., et al. (2024). A rapid environmental risk assessment of the Kakhovka Dam breach during the Ukraine conflict. *Nature Ecology & Evolution*, 8, 834–836. https://doi.org/10.1038/s41559-024-02373-0
8. Shumilova, O., et al. (2025). Environmental effects of the Kakhovka Dam destruction by warfare in Ukraine. *Science*, 387, 1181–1186. https://doi.org/10.1126/science.adn8655
9. Jiang, D., Khokhlov, V., Tuchkovenko, Y., et al. (2025). The biogeochemical response of the north-western Black Sea to the Kakhovka Dam breach. *Communications Earth & Environment*, 6, 185. https://doi.org/10.1038/s43247-025-02153-z
10. European Space Agency. Sentinel-2. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2
11. Copernicus Data Space Ecosystem. Sentinel-2 documentation. Retrieved from https://documentation.dataspace.copernicus.eu/Data/SentinelMissions/Sentinel2.html
12. Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., et al. (2012). Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.01.014
13. Gholizadeh, M. H., Melesse, A. M., & Reddi, L. A. (2016). A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques. *Sensors*, 16(8), 1298. https://doi.org/10.3390/s16081298
14. Goodrich, S., Schaeffer, B., Meyers, K., et al. (2026). Sentinel-2 for chlorophyll-a water quality monitoring: A review of validation evidence and application potential. *International Journal of Remote Sensing.* https://doi.org/10.1080/01431161.2026.2637851
15. Tian, S., Guo, H., Xu, W., et al. (2023). Remote sensing retrieval of inland water quality parameters using Sentinel-2 and multiple machine learning algorithms. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 18617–18630. https://doi.org/10.1007/s11356-022-23431-9
16. Toming, K., Kutser, T., Laas, A., Sepp, M., Paavel, B., & Nõges, T. (2016). First experiences in mapping lake water quality parameters with Sentinel-2 MSI imagery. *Remote Sensing*, 8(8), 640. https://doi.org/10.3390/rs8080640
17. Chowdhury, M., Vilas, C., van Bergeijk, S., Navarro, G., Laiz, I., & Caballero, I. (2023). Monitoring turbidity in a highly variable estuary using Sentinel 2-A/B for ecosystem management applications. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1186441. https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1186441
18. McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. International *Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432. https://doi.org/10.1080/01431169608948714
19. Xu, H. (2006). Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International *Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033. https://doi.org/10.1080/01431160600589179
20. Bid, S., & Siddique, G. (2019). Identification of seasonal variation of water turbidity using NDTI method in Panchet Hill Dam, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 5, 1179–1200. https://doi.org/10.1007/s40808-019-00609-8
21. Mishra, S., & Mishra, D. R. (2012). Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. *Remote Sensing of Environment*, 117, 394–406. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.016
22. Dosovitskiy, A., Beyer, L., Kolesnikov, A., et al. (2021). An Image is Worth 16x16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale. *ICLR 2021*. Retrieved from https://arxiv.org/abs/2010.11929
23. Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., et al. (2017). Attention Is All You Need. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30. Retrieved from https://arxiv.org/abs/1706.03762
24. Lewis, P., Perez, E., Piktus, A., et al. (2020). Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 33, 9459–9474. Retrieved from https://arxiv.org/abs/2005.11401
25. Lischenko, L., Kozlova, A., & Andreiev, A. (2025). Mapping of the spatiotemporal transformations of the former Kakhovka reservoir bed after dam destruction using Sentinel-2 satellite imagery. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 12(4), 29–37. https://doi.org/10.36023/ujrs.2025.12.4.296
26. European Union. Copernicus Emergency Management Service. Retrieved from https://emergency.copernicus.eu/
27. European Environment Agency. (2021). European waters – Assessment of status and pressures 2021. Retrieved from https://www.eea.europa.eu/publications/european-waters-assessment-2021

The article was received by the editors 11.04.2026 The article was revised 10.05.2026
The article is recommended for printing 15.05.2026 This article published 30.05.2026

https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-05
УДК: 502.1:556]:574.5(477)

О. А. КАРАЇМ, канд. екон. наук, доц.,
доцент кафедри екології та охорони навколишнього середовища
e-mail: olha.karaim@vnu.edu.ua ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-1722-4110;
Волинський національний університет імені Лесі Українки,
просп. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., 43025, Україна

ІНДИКАТОРНЕ ОЦІНЮВАННЯ ЕКОСИСТЕМНИХ ПОСЛУГ ПРИКОРДОННОЇ ДІЛЯНКИ РІЧКИ СТИР НА ОСНОВІ ГІДРОХІМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ВОДИ

Мета. Апробація індикаторного підходу до оцінювання екосистемних послуг прикордонної ділянки річки Стир на основі показників якості води.

Методи. Аналітичні, гідрохімічний аналіз, методи екологічної класифікації для оцінки якості поверхневих вод.

Результати. Здійснено індикаторне оцінювання екосистемних послуг прикордонної ділянки річки Стир на основі аналізу гідрохімічних показників якості води за 2021–2025 рр. Встановлено, що за середньорічними значеннями більшість показників відповідає I–III класам якості, що характеризує загалом задовільний стан водного середовища. Визначено, що підтримувальні екосистемні послуги реалізуються на високому та доброму рівнях, тоді як регулювальні та забезпечувальні – переважно на задовільному рівні. Водночас зафіксовано систематичні перевищення за окремими індикаторами, передусім сполуками азоту та органічними речовинами, що свідчить про наявність антропогенного навантаження та зниження ефективності регулювальних функцій екосистеми. Аналіз динаміки показників виявив тенденцію до зростання концентрацій амоній-іонів і наявність епізодичних пікових значень, що відображає нестабільність процесів самоочищення. Для показника $БСК_5$ встановлено тенденцію до зниження, що свідчить про часткове покращення стану окремих екосистемних функцій. Оцінювання за блоковими індексами показало, що за середніми значеннями якість води відповідає III класу (задовільні, помірно забруднені води), тоді як за найгіршими показниками вона переходить до IV–V класів (погані та дуже погані, брудні та дуже брудні води), що вказує на значну варіабельність стану водної екосистеми.

Висновки. Застосування індикаторного підходу до оцінювання екосистемних послуг річки Стир дало змогу інтегрувати гідрохімічні показники якості води в оцінювання функціональних характеристик річкової екосистеми. Нерівномірність реалізації екосистемних послуг: за загалом задовільного середнього стану фіксуються періоди погіршення їх рівня, що свідчить про вразливість екосистеми до антропогенного навантаження. Використання показників якості води дозволяє кількісно інтерпретувати рівень реалізації регулювальних, підтримувальних і забезпечувальних екосистемних послуг. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення підходів до оцінювання та управління водними ресурсами у транскордонних річкових системах.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *індикаторне оцінювання, якість води, транскордонна річка, екосистемні послуги, сталий розвиток*

Як цитувати: Караїм О. А. Індикаторне оцінювання екосистемних послуг прикордонної ділянки річки Стир на основі гідрохімічних показників якості води. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2026. Вип. 34. С. 66–78. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-05

In cites: Karaim, O. A. (2026). Indicator-based assessment of ecosystem services in the transboundary section of the Styr River based on hydrochemical water quality indicators. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology*, (34), 66–78. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-05 (in Ukrainian)

Вступ

У сучасних умовах посилення антропогенного навантаження на водні ресурси особливої актуальності набуває оцінювання стану річкових екосистем через призму їх здатності забезпечувати екосистемні послуги. Річкові системи виконують комплекс регулювальних, забезпечувальних, підтримувальних і культурних функцій, що формують основу екологічної безпеки та соціально-економічного розвитку територій. Водночас деградація якості

© Караїм О. А., 2026
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0

води, трансформація руслових і заплавних екосистем, а також інтенсифікація господарської діяльності знижують ефективність надання цих послуг, що потребує впровадження сучасних підходів до їх кількісного оцінювання. Особливого значення ця проблема набуває для транскордонних річкових систем, де екологічний стан формується під впливом як внутрішніх, так і зовнішніх чинників. Прикордонні ділянки річок характеризуються складною структурою управління, відмінностями у природокористуванні та екологічній політиці суміжних держав, що ускладнює забезпечення узгодженого моніторингу та охорони водних ресурсів.

Одним із підходів до оцінювання екосистемних послуг є індикаторний підхід, який передбачає використання системи кількісних показників для відображення стану екосистем і рівня реалізації їх функцій. У цьому аспекті показники якості води набувають ключового значення, оскільки інтегрують вплив природних і антропогенних чинників та безпосередньо відображають здатність водних екосистем до самоочищення, підтримки біорізноманіття та забезпечення їх належної якості. Гідрохімічні та гідробіологічні параметри, такі як вміст розчиненого кисню, біохімічне споживання кисню, концентрації біогенних елементів і завислих речовин, можуть бути інтерпретовані як індикатори відповідних екосистемних послуг.

Проблематика екологічного стану водних об’єктів, зокрема, річки Стир, широко представлена у працях вітчизняних та зарубіжних вчених. Основна увага українських дослідників зосереджена на гідрохімічній оцінці якості води та аналізі антропогенного навантаження. Так, у роботі О. Караїм та співавторів [1] обґрунтовано підходи до басейнового екологічного управління, що дозволяють комплексно враховувати вплив господарської діяльності. Дослідження В. Копилова та В. Поповича [2] присвячене вмісту важких металів у воді та прибережних едафотопах, що відображає рівень техногенного забруднення. У роботі П. Кузнєцова та О. Бєдункової [3] проаналізовано просторово-часові зміни вмісту органічних речовин у воді, а І. Нетробчук та співавтори [4] досліджують вплив господарської діяльності на стан басейну річки Стир, підкреслюючи комплексний характер антропогенного тиску. Окремі дослідження спрямовані на вдосконалення підходів до оцінювання якості води та інтерпретації гідрохімічних показників, так у роботі О. Бєдункової та співавторів [5] визначено референтні гідрохімічні умови для річок Західної України, що створює основу для порівняльної оцінки їх стану. У працях І. Ковальчука [6] та О. Мітрясової [7] продемонстровано застосування індикаторів якості води для екологічної оцінки річкових систем у транскордонному контексті.

У зарубіжних дослідженнях акцент зміщується у бік інтегрованого управління водними ресурсами та врахування складності транскордонних водних систем. Зокрема, у роботі М. Фаріда Ахмеда та співавторів [8] підкреслено роль інтегрованого управління річковими басейнами як основи сталого розвитку, тоді як М. Каземі та співавтори [9] розглядають особливості розподілу водних ресурсів у транскордонних басейнах з урахуванням гідрополітичних чинників. Дослідження Сахани Мехебуб, Далі та Ліндлі [10] акцентує увагу на глобальних диспропорціях у вивченні транскордонних річок та їх впливі на ефективність управління. Окремий напрям становлять роботи, присвячені ролі біорізноманіття у функціонуванні водних екосистем, зокрема, Л. Томадон [11] та П. Томінгас [12] зі співавторами підкреслюють значення біотичних компонентів для підтримання екологічної стійкості водних систем.

Водночас у міжнародному науковому дискурсі поширення набуває підхід до аналізу водних екосистем через концепцію екосистемних послуг. Так, дослідження А. Хосровян [13] акцентує увагу на взаємозв’язку біорізноманіття та екосистемних послуг, тоді як Р. Ремме [14] розглядає можливості інтеграції природоорієнтованих рішень у систему управління ними. У праці М. Соуса [15] узагальнено сучасні підходи до оцінювання екосистемних послуг з урахуванням регулювальних, підтримувальних і культурних функцій річкових систем.

Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених оцінці якості поверхневих вод, питання інтеграції цих показників у систему оцінювання екосистемних послуг транскордонних річок залишається недостатньо розробленим. Особливо це стосується малих і середніх річок, для яких характерна

підвищена чутливість до локальних джерел забруднення та змін у землекористуванні.

Метою роботи є апробація індикаторного підходу до оцінювання екосистемних послуг прикордонної ділянки річки Стир на основі показників якості води. Реалізація поставленої мети сприятиме підвищенню обґрунтованості управлінських рішень у сфері охорони водних ресурсів та забезпеченню сталого розвитку басейнових екосистем.

Об’єкти та методи дослідження

Об’єктом дослідження виступає процес формування, просторової диференціації та трансформації екосистемних послуг прикордонної ділянки річки Стир.

Методологічну основу дослідження становить індикаторний підхід до оцінювання екосистемних послуг прикордонної ділянки річки Стир, який передбачає використання показників якості води як індикаторів функціонування річкової екосистеми.

Оцінювання якості води здійснювалося шляхом порівняння фактичних концентрацій гідрохімічних показників із встановленими нормативами для поверхневих вод (ГДК), а також аналізу їх часової динаміки. Такий підхід дозволив визначити рівень відповідності водного середовища екологічним стандартам та виявити тенденції зміни стану річкової екосистеми.

Загальна схема дослідження включала послідовні етапи:

– встановлення відповідності показників якості води нормативним значенням;

– ідентифікацію відхилень та аналіз можливих джерел антропогенного впливу;

– класифікацію якості води за екологічними категоріями;

– інтерпретацію отриманих результатів у контексті екосистемних послуг (регулювальних, підтримувальних, забезпечувальних);

– формування висновків щодо стану екосистемних послуг та розробку рекомендацій для сталого управління водними ресурсами.

Методика дослідження базується на орієнтовній екологічній оцінці якості поверхневих вод, що передбачає використання репрезентативного набору гідрохімічних індикаторів, які найбільш повно відображають сучасний екологічний стан водного об’єкта. До таких індикаторів віднесено: вміст розчиненого кисню, біохімічне споживання кисню ($БСК_5$), завислі речовини, концентрації амонійного, нітритного та нітратного азоту, загального азоту, фосфатів, сульфатів і хлоридів [16, 17].

Оцінювання здійснювалося за двома функціональними блоками показників: сольовим (Іс) та трофо-сапробіологічним (Іт-с). Сольовий блок включав показники мінералізації води (хлориди, сульфати). Трофо-сапробіологічний блок охоплював показники кисневого режиму, вмісту біогенних елементів і органічних речовин ($БСК_5$, азотні та фосфорні сполуки, завислі речовини).

На основі порівняння фактичних значень показників із нормативними критеріями визначалися класи та категорії якості води відповідно до екологічної класифікації. Для підвищення точності оцінювання застосовано розрахунок уточненого значення категорії якості води, що визначалося за формулою:

$$Ку = К + (Ас - К_{min})/(К_{max} - К_{min}) \quad (1)$$

Де Ку – уточнене значення категорії якості води; К – номер категорії; Ас – фактичне значення показника; $К_{min}$ і $К_{max}$ – межі відповідного інтервалу категорії [16; 17].

У дослідженні використано екологічну класифікацію якості вод, яка передбачає поділ на п’ять класів (I–V) та сім категорій (1–7) залежно від екологічного стану і ступеня чистоти (забрудненості).

I клас (категорія 1) відповідає водам відмінної якості − відмінні (В), що характеризуються як дуже чисті (ДЧ).

II клас (категорії 2–3) охоплює води доброї якості: дуже добрі (ДД) та добрі (Д), які за ступенем чистоти визначаються як чисті (Ч) або досить чисті (ДЧ).

III клас (категорії 4–5) включає води задовільної якості: задовільні (З) та посередні (Пс), що відповідають слабко забрудненим (СЗ) і помірно забрудненим (ПЗ) водам.

IV клас (категорія 6) представлений водами поганої якості − погані (П), які характеризуються як брудні (Б).

V клас (категорія 7) відповідає водам дуже поганої якості − дуже погані (ДП), що відносяться до дуже брудних (ДБ) [6; 16; 17].

Визначення типу екосистемної послуги здійснювалося на основі функціональної ролі відповідних гідрохімічних показників у підтриманні екологічного стану водної екосистеми. Зокрема, показники кисневого режиму (розчинений кисень) та вміст завислих речовин віднесено до допоміжних (підтримувальних) екосистемних послуг (ДП), оскільки вони визначають умови існування гідро-

біонтів, прозорість води та стабільність середовища. Сполуки азоту (амоній, нітрити, нітрати, загальний азот), фосфору (фосфати) та органічні речовини ($БСК_5$) віднесено до регулювальних послуг (РП), оскільки вони характеризують інтенсивність біогеохімічних процесів, рівень евтрофікації та здатність водної екосистеми до самоочищення. Показники сольового складу (хлориди, сульфати) віднесено до забезпечувальних екосистемних послуг (ЗП), оскільки вони визначають придатність води для господарського використання та її ресурсну цінність [14, 18, 19].

Рівень забезпечення екосистемних послуг визначався шляхом інтерпретації класів якості води відповідно до екологічної класифікації: I клас – високий рівень (В),
II – добрий (Д),
III – задовільний (З),
IV – низький (Н),
V – дуже низький (ДН).

Такий підхід дозволяє співставити кількісні гідрохімічні показники з функціональними характеристиками річкової екосистеми та оцінити рівень забезпечення екосистемних послуг.

Таким чином, використаний методичний підхід забезпечує зв'язок між гідрохімічними характеристиками води та функціонуванням екосистемних послуг, що дозволяє здійснити науково обґрунтоване оцінювання стану прикордонної ділянки річки Стир.

Результати та обговорення

Стир – транскордонна річка басейну Дніпра, права притока Прип'яті, що протікає територією України (Львівська, Волинська, Рівненська області) та Білорусі. Її витоки розташовані поблизу села Пониква Львівської області. Довжина Стиру становить 483 км, площа басейну – 13 130 км², середній похил русла – 0,20 м/км. Долина річки має переважно трапецієподібну форму, місцями з нечітко окресленими контурами. Її схили висотою 5–15 м є більш крутими у верхній і середній течіях. Заплава здебільшого двостороння, із середньою шириною 0,7–1,0 км. Русло у верхній та середній частинах характеризується значною звивистістю, що відображає особливості морфологічної будови річки [20, 21].

Оцінювання екосистемних послуг прикордонної ділянки річки Стир здійснено на основі аналізу показників якості води як ключових індикаторів функціонування річкової екосистеми за період 2021–2025 рр. з урахуванням гранично допустимих концентрацій (ОБУВ). Інформаційною базою дослідження слугували дані моніторингового поста спостережень (смт Зарічне) [22].

У межах дослідження проаналізовано репрезентативний набір гідрохімічних показників (амоній-іони, $БСК_5$, завислі речовини, розчинений кисень, нітрати, нітрити, сульфати, фосфати, хлориди), які інтерпретуються як індикатори регулювальних, підтримувальних і забезпечувальних екосистемних послуг. Розраховані середньорічні значення показників, що відображають стан водного середовища та рівень реалізації екосистемних функцій, наведено в табл. 1.

Аналіз показників якості води, засвідчив, що упродовж 2021–2025 рр. найбільш критичним параметром є концентрація амоній-іонів. Якщо у 2021 р. їх середньорічне

Таблиця 1

Якість поверхневих вод річки Стир за середньорічними показниками*

Table 1

Surface Water Quality of the Styr River Based on Annual Average Indicators

Рік	Азот загальний	Амоній-іони	$БСК_5$	Завислі речовини	Розчинений кисень	Нітрати	Нітрити	Сульфати	Фосфати	Хлориди
2021	0.47	0.38	3.11	4.7	7.84	1.07	0.07	28	0.08	24.28
2022	0.92	0.62	3.09	3.85	7.55	1.40	0.05	25.3	0.14	23.29
2023	0.83	0.55	2.58	3.77	8.02	1.18	0.05	22.79	0.10	25.17
2024	1.09	0.88	2.69	2.79	9.08	1.37	0.07	23.72	0.19	22.45
2025	0.85	0.69	2.44	3.18	10.15	1.15	0.05	22.72	0.11	24.24
ГДК		0,5	3	15	Не < 4	40	0,08	100	2,15	300

*Джерело: розраховано автором за даними [22].

значення (0,38 мг/дм³) відповідало нормативним вимогам, то впродовж 2022–2025 рр. фіксується стійке перевищення ГДК (0,55–0,88 мг/дм³), що свідчить про зниження здатності екосистеми до самоочищення та погіршення регулювальних функцій (рис. 1).

Поліноміальний тренд ($R^2 = 0,686$) відображає загальну висхідну динаміку з максимумом у 2024 р., що свідчить про накопичення органічного навантаження в екосистемі. Якщо у 2021 р. концентрація амоній-іонів перебувала в межах нормативних значень, то вже з 2022 р. спостерігається стабільне перевищення ГДК, із піковим значенням 0,88 мг/дм³ у 2024 р. У 2025 р. фіксується зниження до 0,69 мг/дм³, однак рівень забруднення залишається вище нормативного порогу, що вказує на проблему стійкого відновлення екосистеми.

Зазначимо також, що деталізація динаміки первинних базових показників амоній-іонів показує наявність короткочасних, але інтенсивних пікових концентрацій (до 2,81 мг/дм³ у 2024 р. та 2,64 мг/дм³ у 2025 р.), які вказують на епізодичні надходження органічного забруднення.

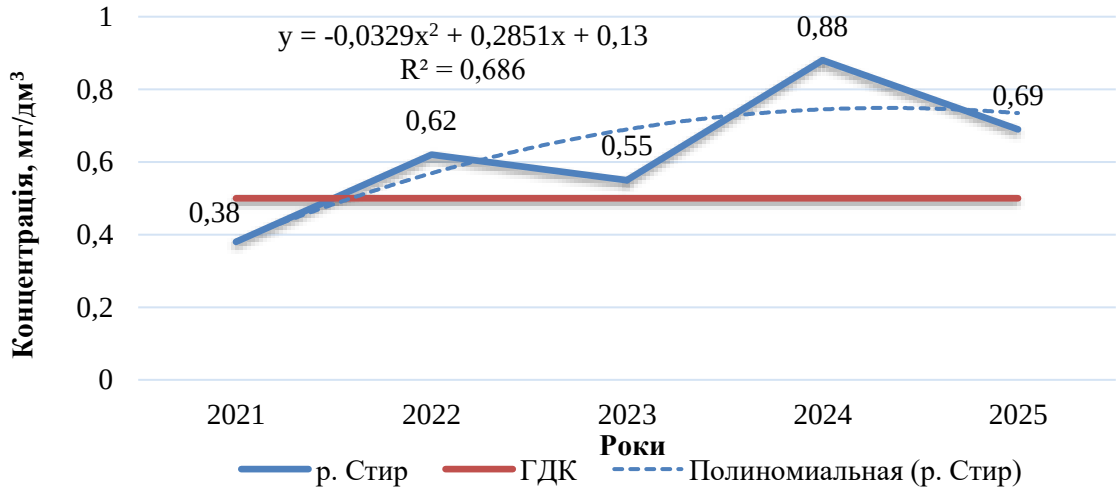


Рис. 1 – Середньорічні показники концентрації азоту амонійного у поверхневих водах прикордонної ділянки річки Стир

Fig. 1 – Annual average concentrations of ammonium nitrogen in the surface waters of the transboundary section of the Styr River

Представлені результати вказують на те, що зростання вмісту амоній-іонів означає, що річка Стир гірше справляється зі своєю природною функцією самоочищення. У нормальних умовах водна екосистема здатна переробляти та нейтралізувати органічні забруднення завдяки біохімічним процесам. Однак виявлене підвищення концентрацій, особливо у 2024 році, свідчить про те, що ці механізми перевантажені й уже не забезпечують належного очищення води. Крім того, підвищений вміст амонію негативно впливає на живі організми у воді. Це може призводити до зменшення біорізноманіття та порушення природної рівноваги екосистеми, зокрема через розвиток процесів евтрофікації.

Водночас погіршення якості води безпосередньо впливає і на її практичне використання. Коли концентрації забруднювачів перевищують нормативи, вода стає менш придатною для господарських потреб, а її очищення потребує більших витрат. Таким чином, знижується ефективність забезпечувальних послуг річки, які пов'язані з використанням водних ресурсів.

У контексті оцінювання екосистемних послуг річки Стир показник біохімічного споживання кисню ($БСК_5$) розглядається як індикатор інтенсивності органічного навантаження та ефективності процесів самоочищення. Встановлено, що у 2021–2022 рр. середньорічні значення $БСК_5$ (3,11 та 3,09 $мгO_2/дм^3$ відповідно) перевищували нормативний рівень, що свідчить про підвищений вміст органічних речовин і, відповідно, зниження ефективності регулювальних екосистемних послуг. Упродовж 2023–2025 рр. спостерігається зниження показника до нормативних значень (рис. 2), що вказує на часткове відновлення здатності річкової екосистеми до біохімічного окиснення органічних сполук і покращення умов функціонування.

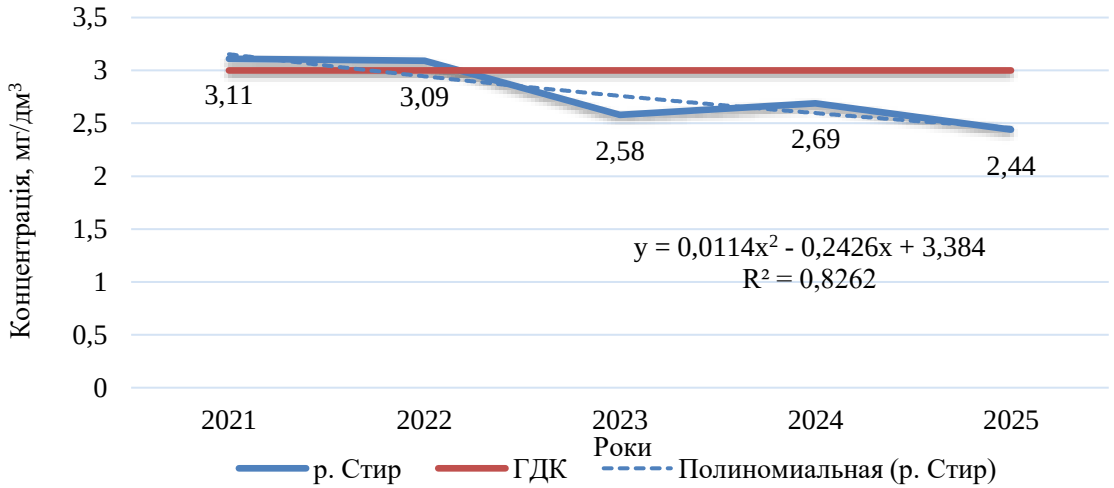


Рис. 2 – Середньорічні показники $БСК_5$ у поверхневих водах прикордонної ділянки річки Стир

Fig. 2 – Annual average BOD_5 values in the surface waters of the transboundary section of the Styr River

Аналіз тренду середньорічних значень $БСК_5$ у річці Стир за 2021–2025 рр. у контексті екосистемних послуг свідчить про поступове покращення функціонування річкової екосистеми, насамперед у частині регулювальних функцій.

На початку досліджуваного періоду (2021–2022 рр.) значення $БСК_5$ перевищували нормативний рівень, що вказує на підвищене органічне навантаження та зниження ефективності природних процесів самоочищення. Це означає, що регулювальні екосистемні послуги реалізовувалися не повною мірою. Починаючи з 2023 року, спостерігається чітка тенденція до зниження показника (2,58–2,44 $мгO_2/дм^3$), що підтверджується поліноміальним трендом ($R^2 = 0,8262$) і свідчить про стабілізацію та часткове відновлення екосистемних процесів. Зменшення $БСК_5$ означає зниження вмісту органічних речовин у воді та покращення кисневого режиму, що прямо вказує на відновлення регулювальних послуг, зокрема здатності екосистеми до біохімічного окиснення та самоочищення.

Що стосується первинних базових даних $БСК_5$ то у 2021 р. цей показник досягав 4,59 $мгO_2/дм^3$, у 2022 р. – 3,92 $мгO_2/дм^3$, а у 2024 р. – 5,73 $мгO_2/дм^3$, що підтверджує епізодичні надходження органічних забруднень. Хоча більшість таких перевищень мають поодинокий характер, вони створюють короткочасне навантаження на процеси самоочищення, знижуючи ефективність регулювальних послуг та погіршуючи умови для функціонування водних організмів.

У контексті оцінювання екосистемних послуг річки Стир встановлено, що концентрації завислих речовин загалом перебувають у межах допустимих значень (до 15 $мг/дм^3$), що свідчить про відносно стабільний стан допоміжних (підтримувальних) екосистемних послуг, зокрема формування сприятливих умов для існування гідробіонтів і підтримання прозорості водного середовища. Водночас їх періодичне зростання в окремі роки може бути пов'язане з активізацією ерозійних процесів або паводковими явищами, що тимчасово погіршує світлопроникність води та може знижувати ефективність цих функцій.

Вміст розчиненого кисню переважно відповідає нормативному рівню (не менше 4 $мг/дм^3$), що вказує на загалом задовільний кисневий режим і належне функціонування допоміжних (підтримувальних) екосистемних послуг, зокрема створення сприятливих умов для існування гідробіонтів. Разом із тим у періоди підвищеного органічного навантаження можливе незначне зниження концентрації кисню, що відображає короткочасне погіршення умов функціонування екосистеми.

Низькі концентрації нітратів (суттєво нижчі за ГДК 40 $мг/дм^3$) свідчать про відсутність критичного забруднення та стабільність регулювальних послуг у частині біогеохімічного кругообігу азоту. Водночас періодичне наближення нітритів до граничних значень (0,08 $мг/дм^3$) відображає активні трансформаційні процеси (нітрифікації–денітрифікації), що є індикатором напруження в роботі самоочисних механізмів.

Концентрації сульфатів і хлоридів залишаються в межах нормативів (100 та 300 мг/дм³ відповідно), що свідчить про відсутність суттєвого техногенного навантаження та відносну стабільність забезпечувальних екосистемних послуг, пов'язаних із якістю водних ресурсів.

Концентрації фосфатів також не перевищують встановленого нормативу (2,15 мг/дм³), однак їх тенденція до зростання в окремі роки може вказувати на розвиток евтрофікаційних процесів. Це свідчить про потенційне погіршення регулювальних екосистемних послуг, зокрема здатності водної екосистеми до саморегуляції та контролю біогенних навантажень.

З метою оцінювання екосистемних послуг річки Стир значення окремих гідрохімічних показників було зіставлено з нормативними критеріями якості води, визначеними у системі екологічної класифікації [16]. Такий підхід дозволяє інтерпретувати якість водного середовища як індикатор рівня реалізації регулювальних, підтримувальних і забезпечувальних екосистемних послуг.

Результати класифікації, що відображають якість води та рівень забезпечення екосистемних послуг річки Стир за середньорічними показниками впродовж 2021–2025 рр., наведено в табл. 2. Отримані результати класифікації якості води річки Стир за середньорічними показниками 2021–2025 рр. по-

Таблиця 2

Якість води та рівень забезпечення екосистемних послуг річки Стир (за середніми показниками 2021–2025 рр.)

Table 2

Water Quality and Level of Ecosystem Service Provision of the Styr River (Based on Average Indicators for 2021–2025)

Блок	Назва інгредієнтів	Результат вимірювання, мг/дм³	Категорія якості оди/ Уточнена категорі	Клас якості води	Класи і категорії якості води за станом	Класи і категорії якості води за ступенем чистоти	Тип екосистемної послуги	Рівень забезпечення екосистемної послуги
Іс	Хлориди	23,89	5/5,32	III	З/ПС	Зб/ПЗ	ЗП	З
	Сульфати	24,51	5/5,39	III	З/ПС	Зб/ПЗ	ЗП	З
Іт-с	Завислі речовини	3,66	1/1,73	I	В/В	ДжЧ/ДжЧ	ДП	В
	Розчинений кисень	8,53	1/1,53	I	В/В	ДжЧ/ДжЧ	ДП	В
	БСК 5	2,78	4/4,32	III	З/З	Зб/СЗ	РП	З
	Азот амонійний	0,62	5/5,22	III	З/ПС	Зб/ПЗ	РП	З
	Азот загальний	0,83	1/1,81	I	В/В	ДжЧ/ДжЧ	РП	В
	Нітрити	0,06	6/6,18	IV	П/П	Б/Б	РП	Н
	Нітрати	1,23	6/6,15	IV	П/П	Б/Б	РП	Н
	Фосфати	0,12	5/5,19	III	З/ПС	Зб/ПЗ	РП	З

казують, що в межах сольового блоку (Іс) концентрації хлоридів і сульфатів відповідають III класу якості (категорії 5/5,32 та 5/5,39), що характеризується як задовільні, посередні та помірно забруднені води. Це свідчить про задовільний рівень забезпечення забезпечувальних екосистемних послуг, зокрема придатності води для господарського використання, та вказує на наявність помірного антропогенного впливу без ознак критичної деградації водного середовища.

Трофо-сапробіологічний блок (Іт-с) характеризується неоднорідністю показників якості води. З одного боку, значення завислих речовин та розчиненого кисню відповідають I класу якості (відмінні, дуже чисті води), що свідчить про високий рівень забезпечення допоміжних (підтримувальних) екосистемних послуг, зокрема формування сприятливих умов для існування гідробіонтів і підтримання екологічної стабільності водного середовища. Високий рівень якості також характерний для загального азоту (I клас), що вказує на відсутність надмірного трофічного навантаження.

Водночас окремі показники відображають зниження ефективності регулювальних

екосистемних послуг. Так, значення $БСК_5$ та амонійного азоту відповідають III класу якості (задовільні, помірно забруднені води), що свідчить про задовільний рівень реалізації регулювальних функцій, однак вказує на наявність органічного та біогенного навантаження і обмежену здатність водної екосистеми до самоочищення.

Найбільш несприятлива ситуація спостерігається для нітритів і нітратів, які відповідають IV класу якості (погані, брудні води). Це є індикатором порушення процесів трансформації сполук азоту та свідчить про низький рівень забезпечення регулювальних екосистемних послуг, а також створює потенційні ризики для підтримувальних функцій екосистеми.

Концентрації фосфатів відповідають III класу якості (задовільні, помірно забруднені води), що вказує на задовільний рівень регулювальних екосистемних послуг. Водночас наявна тенденція до їх зростання може свідчити про розвиток евтрофікаційних процесів і поступове погіршення екологічної рівноваги.

Розрахований індекс сольового складу ($Іс_{серед.} = 5,36$) відповідає п'ятій із переходом у шосту субкатегорії якості води, що в межах екологічної класифікації відповідає III–IV класам якості. З позицій екосистемних послуг це свідчить про задовільний із тенденцією до зниження рівень забезпечення забезпечувальних функцій, зокрема придатності води для господарського використання. Такі значення індексу вказують на помірний рівень мінералізації води та наявність антропогенного впливу, що може обмежувати використання водних ресурсів без попередньої обробки.

Водночас індекс трофо-сапробіологічних показників ($Іт\text{-}с_{серед.} = 4,02$) відповідає четвертій субкатегорії якості води, що узгоджується з III класом (задовільні, помірно забруднені води). Це свідчить про задовільний рівень реалізації регулювальних і допоміжних (підтримувальних) екосистемних послуг, однак вказує на наявність органічного та біогенного навантаження, яке впливає на ефективність процесів самоочищення, кисневий режим і умови існування гідробіонтів.

Узагальнення отриманих індексів свідчить, що екосистемні послуги річки загалом відповідають задовільному рівню. Водночас забезпечувальні послуги характеризуються тенденцією до зниження, що відображає певні обмеження придатності води для господарського використання. Регулювальні та підтримувальні послуги також є задовільними, однак їх стан формується під впливом органічного та біогенного навантаження, що обмежує ефективність процесів самоочищення та підтримання екологічної рівноваги. Це вказує на необхідність удосконалення управління якістю води в межах транскордонного басейну з метою забезпечення стабільності функціонування річкової екосистеми.

Аналіз класифікації якості води за найгіршими значеннями показників у 2021–2025 рр. дозволяє оцінити граничні стани функціонування екосистемних послуг річки Стир та виявити найбільш уразливі елементи річкової екосистеми (табл. 3).

Результати оцінювання якості води річки Стир за найгіршими показниками 2021–2025 рр. свідчать про суттєве погіршення стану водного середовища та зниження рівня забезпечення екосистемних послуг.

У межах сольового блоку (Іс) концентрації хлоридів і сульфатів відповідають IV класу якості (погані, брудні води), що відображає низький рівень забезпечувальних екосистемних послуг та свідчить про зниження придатності води для господарського використання під впливом антропогенних чинників.

У трофо-сапробіологічному блоці (Іт-с) спостерігається значна варіабельність показників. Зокрема, завислі речовини відповідають II класу якості (добрі, чисті води), що характеризує добрий рівень підтримувальних екосистемних послуг. Водночас концентрація розчиненого кисню відповідає III класу, що свідчить про задовільний рівень умов існування гідробіонтів.

Показники, що характеризують органічне та біогенне навантаження, демонструють суттєве погіршення стану регулювальних функцій екосистеми. Значення $БСК_5$ відповідає III класу якості, що відображає задовільний рівень регулювальних екосистемних послуг. Натомість амонійний азот, нітрити, нітрати та фосфати відповідають V класу якості (дуже погані, дуже брудні води), що свідчить про дуже низький рівень забезпечення регулювальних екосистемних послуг та вказує на порушення процесів трансформації біогенних речовин і значне перевантаження системи самоочищення.

Загальний азот відповідає III класу якості, що характеризує задовільний рівень регулювальних функцій, однак у поєднанні з високими концентраціями окремих форм азоту свідчить про дисбаланс у процесах азотного циклу.

Таблиця 3

Якість води та рівень забезпечення екосистемних послуг річки Стир (за найгіршим показниками 2021–2025 рр.)

Table 3

Water Quality and Level of Ecosystem Service Provision of the Styr River (Based on the Worst Indicators for 2021–2025)

Блок	Назва інгредієнтів	Результат вимірювання, мг/дм³	Категорія якості води/ Уточнена категорія	Клас якості води	Класи і категорії якості води за станом	Класи і категорії якості води за ступенем чистоти	Тип екосистемної послуги	Рівень забезпечення екосистемної послуги
Іс	Хлориди	43,23	6/6,18	IV	П/П	Б/Б	ЗП	Н
	Сульфати	34,77	6/6,05	IV	П/П	Б/Б	ЗП	Н
Іт-с	Завислі речовини	6,60	2/2,32	II	Д/ДД	Ч/Ч	ДП	Д
	Розчинений кисень	5,80	5/5,78	III	З/Пс	Зб/ПЗ	ДП	З
	БСК 5	5,28	5/5,41	III	З/Пс	Зб/ПЗ	РП	З
	Азот амонійний	2,81	7/7,62	V	ДП/ДП	ДБ/ДБ	РП	ДН
	Азот загальний	2,55	4/4,24	III	З/З	Зб/СЗ	РП	З
	Нітрити	0,22	7/7	V	ДП/ДП	ДБ/ДБ	РП	ДН
	Нітрати	2,81	7/7	V	ДП/ДП	ДБ/ДБ	РП	ДН
	Фосфати	0,49	7/7	V	ДП/ДП	ДБ/ДБ	РП	ДН

Таким чином, аналіз найгірших показників показує, що у періоди підвищеного навантаження екосистемні послуги річки Стир суттєво погіршуються. Зокрема, забезпечувальні функції знижуються до низького рівня, що відображає обмежену придатність води для господарського використання, тоді як регулювальні послуги за окремими показниками переходять до дуже низького рівня, що свідчить про порушення процесів самоочищення та трансформації біогенних речовин. Підтримувальні послуги загалом зберігають від задовільного до доброго рівня, однак також демонструють чутливість до зростання антропогенного навантаження. Це підтверджує необхідність урахування граничних (найгірших) значень показників при оцінюванні екосистемних послуг та обґрунтуванні управлінських рішень.

Розрахований індекс сольового складу за найгіршими показниками ($Іс_{найг.} = 6,12$) відповідає шостій субкатегорії якості води, що узгоджується з IV класом (погані, брудні води). Це свідчить про низький рівень забезпечення забезпечувальних екосистемних послуг, зокрема придатності води для господарського використання, та відображає підвищене мінералізаційне навантаження в окремі періоди. Такі значення індексу вказують на вплив антропогенних чинників, за яких якість води погіршується до рівня, що потребує додаткової обробки перед використанням.

Індекс трофо-сапробіологічних показників ($Іт\text{-}_{снайг.} = 5,8$) відповідає п’ятій із переходом у шосту субкатегорії якості води, що відповідає IV–V класам (погані та дуже погані води). Це свідчить про низький із переходом до дуже низького рівень забезпечення регулювальних екосистемних послуг, пов’язаних із процесами самоочищення та трансформації біогенних речовин. Такі значення індексу відображають періоди підвищеного органічного та біогенного навантаження, що супроводжуються порушенням кисневого режиму та активізацією евтрофікаційних процесів.

Отже, блокові індекси за найгіршими показниками показують, що в періоди максимального антропогенного навантаження екосистемні послуги річки Стир істотно знижуються: забезпечувальні послуги характеризуються низьким рівнем, тоді як регулювальні – низьким або дуже низьким рівнем забезпечення. Це підтверджує доцільність урахування граничних (найгірших) значень

показників як важливих індикаторів у системі оцінювання якості води та управління екосистемними послугами транскордонних річок.

Висновки

Застосування індикаторного підходу до оцінювання екосистемних послуг прикордонної ділянки річки Стир дозволило концептуально поєднати гідрохімічні показники якості води з функціональними характеристиками річкової екосистеми. Це підтверджує, що показники якості води можуть ефективно виступати універсальними індикаторами стану регулювальних, підтримувальних і забезпечувальних екосистемних послуг.

Ключовим результатом є встановлення нерівномірності реалізації екосистемних послуг: навіть за відносно прийнятного середнього стану екосистеми фіксуються періоди її функціональної нестабільності. Така диспропорція свідчить про приховану вразливість річкової системи, яка не відображається повною мірою у середніх значеннях показників, але проявляється у критичних епізодах навантаження.

Отримані результати мають важливе методичне значення, оскільки доводять доцільність використання поєднання середніх і граничних (найгірших) значень показників у системі оцінювання екосистемних послуг. Це дозволяє більш повно врахувати як фоновий стан екосистеми, так і її реакцію на пікові антропогенні впливи, що є особливо актуальним для транскордонних водних об’єктів.

Практична значущість дослідження полягає у можливості використання запропонованого підходу для вдосконалення системи моніторингу та управління водними ресурсами. Інтеграція показників якості води в оцінювання екосистемних послуг створює науково обґрунтовану основу для прийняття управлінських рішень, спрямованих на підвищення екологічної стійкості річкових екосистем, мінімізацію транскордонних ризиків забруднення та забезпечення сталого використання водних ресурсів.

Таким чином, індикаторне оцінювання екосистемних послуг на основі показників якості води дозволяє не лише діагностувати екологічний стан річкової екосистеми, а й інтерпретувати рівень реалізації її ключових функцій. Такий підхід забезпечує можливість цілеспрямовано оцінювати стан регулювальних, підтримувальних і забезпечувальних екосистемних послуг, виявляти їх критичні порушення та визначати пріоритети для відновлення. Це створює науково обґрунтовану основу для управління річковими екосистемами, орієнтовану на забезпечення екосистемних послуг та сталого розвитку річкових басейнів.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису немає. Крім того, автором повністю дотримано етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Декларація про використання ШІ

В роботі не використано ресурс штучного інтелекту.

Список використаної літератури

1. Караїм О. А., Караїм В. П., Бєдункова О. О., Лавринюк З. В., Джам О. А. Оцінка антропогенного впливу в аспекті басейнового екологічного управління. *Вісник НУВГП. Сільськогосподарські науки : зб. наук. праць*. Рівне: НУВГП. 2024. Вип. 1 (105). С. 97–119. https://doi.org/10.31713/ vs120247
2. Копилов В., Попович В. Вміст важких металів у воді та едафотопах берегової зони ріки Стир. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності.* 2024. № 29. С. 5–11. https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20784643.29.2024.01
3. Кузнєцов П. М., Бєдункова О. О. Ідентифікація та просторово-часові зміни показників вмісту органічних речовин в поверхневих водах р. Стир. *Таврійський науковий вісник. Серія: Сільськогосподарські науки.* 2024. № 135(2). С. 249–256. https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.135.1.33
4. Нетробчук І. М., Полянський С. В., Білецький Ю. В., Соловей В. В., Качаровський Р. Є., Лівик С. А. Вплив господарської діяльності людини на стан басейну р. Стир. Věda a perspektivy. 2025. № 4 8.(47). С. 126–139. https://doi.org/10.52058/2695-1592-2025-4(47)-126-139

5. Biedunkova O., Kuznietsov P., Tsos O., Boiaryn M., Karaim O. Sustainable Hydrochemical Reference Conditions in the Headwaters of Western Ukraine. Sustainability. 2026. Vol. 18(2). Article 821. https://doi.org/10.3390/su18020821
6. Kovalchuk I., Karaim O., Dzham O., Lavrynyuk Z., Karaim V. 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. 2025. Vol. (62). P. 424-436. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-32
7. Mitryasova O., Mats A., Salamon I., Smyrnov V., Chvyr, V. Study the Nexus between Indicators of Surface Water Quality on the Small River for Better Basin Management. Journal Of Environmental Management And Tourism. 2023. Vol. 14(5). P. 2187–2195. https://doi.org/10.14505/jemt.v14.5(69).03
8. Farid Ahmed M., Mokhtar M. B., Lim C. K., Suza I. A. B. C., Ayob K. A. K., Khirotdin R. P. K., Majid N. A. Integrated River Basin Management for Sustainable Development: Time for Stronger Action. Water. 2023. Vol. 15(13). Article 2497. https://doi.org/10.3390/w15132497
9. Kazemi M., Bozorg-Haddad O., Fallah-Mehdipour E., Chu X. Optimal water resources allocation in transboundary river basins according to hydropolitical consideration. Environment. Development and Sustainability. 2022. Vol. 24. https://doi.org/10.1007/s10668-021-01491-0
10. Sahana Mehebub, Dhali Dr, Lindley Sarah. Global disparities in transboundary river research have implications for sustainable management. Communications Earth & Environment. 2024. Vol. 5. https://doi.org/10.1038/s43247-024-01928-0
11. Tomadon L. S., do Couto E. V., Bailly D., et al. Incorporating aquatic biodiversity into sustainability index for hydrographic sub-basins: a multi-criteria stakeholder assessment approach in the Upper Paraná River. Hydrobiologia. 2024. Vol. 851. P. 4905–4926. https://doi.org/10.1007/s10750-024-05648-6
12. Tomingas P., Kont R., Lõhmus A., Vaikre M. Diversity of small waterbodies sustains aquatic biodiversity in drained forest landscapes. Hydrobiologia. 2025. Vol. 852. P. 1677–1692. https://doi.org/10.1007/s10750-024-05770-5
13. Khosrovyan A. Biodiversity and Ecosystem Services in Rivers. Water. 2024. Vol. 16(15). Article 2091. https://doi.org/10.3390/w16152091
14. Remme R. P., Meacham M., Pellowe K. E., Andersson E. Et all. Aligning nature-based solutions with ecosystem services in the urban century. Ecosystem Services. 2024. Vol. 66. Article 101610. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2024.101610
15. Sousa M. C., Martins R., Simões N. E., Feio M. J. Ecosystem services of urban rivers: a systematic review. Aquatic Sciences. 2025. Vol. 87. Article 10. https://doi.org/10.1007/s00027-024-01138-y
16. Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями / А. В. Гриценко, О. Г. Васенко, Г. А. Верніченко та ін. Х.: УкрНДІЕП. 2012. 37 с.
17. Романенко В. Д., Жукинський В. М., Оксіюк О. П., Яцик А. П. та ін. Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями. К.: СИМВОЛ–1, 1998. 50 с.
18. MAWeb.org. Ecosystems. URL: https://maweb.org/ecosystems/ (дата звернення: 30.03.2026)
19. Millennium Ecosystem Assessment. Overview of the Milliennium Ecosystem Assessment. URL: https://www.millenniumassessment.org/en/About.html (дата звернення: 30.03.2026)
20. Стир. Регіональний офіс водних ресурсів у Волинській області. Офіційний сайт. URL: https://vodres.gov.ua/node/1353 (дата звернення: 30.03.2026)
21. Український гідрометеорологічний центр. Офіційний сайт. URL: https://www.meteo.gov.ua/ (дата звернення: 30.03.2026)
22. Моніторинг та екологічна оцінка водних ресурсів України. Державне агенство водних ресурсів України. Офіційний сайт. URL: http://monitoring.davr.gov.ua/EcoWaterMon/GDKMap/Index (дата звернення: 30.03.2026)

Стаття надійшла до редакції 11.04.2026 Переглянуто 13.05.2026
Стаття рекомендована до друку 17.05.2026 Опубліковано 30.05.2026

O. A. KARAIM, PhD (Economy),
Associate Professor of the Department of Ecology and Protection of Environment,
e-mail: olha.karaim@vnu.edu.ua ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-1722-4110
Lesya Ukrainka Volyn National University,
13 Voli Ave., Lutsk, Volyn region, 43025, Ukraine

INDICATOR-BASED ASSESSMENT OF ECOSYSTEM SERVICES IN THE TRANSBOUNDARY SECTION OF THE STYR RIVER BASED ON HYDROCHEMICAL WATER QUALITY INDICATORS

Purpose. To test an indicator-based approach for assessing ecosystem services in the transboundary section of the Styr River based on water quality parameters.

Methods. Analytical, hydrochemical analysis, and ecological classification methods for surface water quality assessment.

Results. An indicator-based assessment of ecosystem services in the transboundary section of the Styr River was carried out based on hydrochemical water quality parameters for 2021–2025. It was found that, according to annual average values, most indicators correspond to Classes I–III, indicating a generally satisfactory state of the aquatic environment. Supporting ecosystem services are maintained at high and good levels, while regulating and provisioning services are predominantly at a satisfactory level. At the same time, systematic exceedances were identified for certain indicators, particularly nitrogen compounds and organic matter, indicating anthropogenic pressure and reduced efficiency of regulating ecosystem functions. The analysis of temporal dynamics revealed an increasing trend in ammonium concentrations and the occurrence of episodic peak values, reflecting instability in self-purification processes. A decreasing trend in BOD_5 values was observed, indicating partial improvement in certain ecosystem functions. Assessment based on block indices showed that, under average conditions, water quality corresponds to Class III (satisfactory, moderately polluted waters), whereas under worst-case conditions it shifts to Classes IV–V (poor and very poor, polluted and heavily polluted waters), indicating significant variability in ecosystem condition.

Conclusions. The application of the indicator-based approach enabled the integration of hydrochemical water quality parameters into the assessment of river ecosystem functioning. Uneven provision of ecosystem services was identified: despite an overall satisfactory average condition, periods of deterioration occur, indicating the ecosystem's vulnerability to anthropogenic pressure. The results demonstrate that water quality indicators can be used to quantitatively interpret the level of regulating, supporting, and provisioning ecosystem services. The proposed approach can be applied to improve water resource assessment and management in transboundary river systems.

KEYWORDS: *indicator-based assessment, water quality, transboundary river, ecosystem services, sustainable development*

Conflict of Interest

The author declares no conflict of interest regarding the publication of this manuscript. Furthermore, the author has fully adhered to ethical norms, including avoiding plagiarism, data falsification, and duplicate publication.

AI Statement

The work does not use artificial intelligence resources.

References

1. Karaim O. A., Karaim, V. P., Biedunkova O. O., Lavryniuk Z. V., & Dzham O. A. (2024). Evaluation of anthropogenic impact in the aspect of basin ecological management. *Bulletin of the National University of Water and Environmental Engineering. (Agricultural Sciences Series)*, *1*(105), 97–119. https://doi.org/10.31713/vs120247 (in Ukrainian).
2. Kopylov, V., & Popovych, V. (2024). Content of heavy metals in water and edafotopah of the river Styr coastal zone. *Bulletin of Lviv State University of Life Safety*, *29*, 5-11. https://doi.org/10.32447/20784643.29.2024.01 (in Ukrainian).
3. Kuznietsov, P. M., & Biedunkova, O. O. (2024). Carbon compounds in the surface water identifying concentrations and sources. *Taurida Scientific Herald. Series: Rural Sciences*, 135(2), 249–256. https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.135.1.33 (in Ukrainian).

4. Netrobchuk, I. M., Polianskyi, S. V., Biletskyi, Yu. V., Solovei, V. V., Kacharovskyi, R. Ye., & Livyk, S. A. (2025). The impact of human economic activity on the state of the Stir river basin. *Věda a perspektivy,* 4(47), 126–139. https://doi.org/10.52058/2695-1592-2025-4(47)-126-139 (in Ukrainian).
5. Biedunkova, O., Kuznietsov, P., Tsos, O., Boiaryn, M., & Karaim, O. (2026). Sustainable hydrochemical reference conditions in the headwaters of Western Ukraine. *Sustainability*, 18(2), Article 821. https://doi.org/10.3390/su18020821
6. Kovalchuk, I., Karaim, O., Dzham, O., Lavrynyuk, Z., & Karaim, V. (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).
7. Mitryasova, O., Mats, A., Salamon, I., Smyrnov, V., & Chvyr, V. (2023). Study the nexus between indicators of surface water quality on the small river for better basin management. *Journal of Environmental Management and Tourism*, 14(5), 2187–2195. https://doi.org/10.14505/jemt.v14.5(69).03
8. Farid Ahmed, M., Mokhtar, M. B., Lim, C. K., Suza, I. A. B. C., Ayob, K. A. K., Khirotdin, R. P. K., & Majid, N. A. (2023). Integrated river basin management for sustainable development: Time for stronger action. *Water*, 15(13), Article 2497. https://doi.org/10.3390/w15132497
9. Kazemi, M., Bozorg-Haddad, O., Fallah-Mehdipour, E., & Chu, X. (2022). Optimal water resources allocation in transboundary river basins according to hydropolitical consideration. *Environment, Development and Sustainability*, 24. https://doi.org/10.1007/s10668-021-01491-0
10. Sahana, M., Dhali, D., & Lindley, S. (2024). Global disparities in transboundary river research have implications for sustainable management. *Communications Earth & Environment*, 5. https://doi.org/10.1038/s43247-024-01928-0
11. Tomadon, L. S., do Couto, E. V., Bailly, D., et al. (2024). Incorporating aquatic biodiversity into sustainability index for hydrographic sub-basins: A multi-criteria stakeholder assessment approach in the Upper Paraná River. *Hydrobiologia*, 851, 4905–4926. https://doi.org/10.1007/s10750-024-05648-6
12. Tomingas, P., Kont, R., Lõhmus, A., & Vaikre, M. (2025). Diversity of small waterbodies sustains aquatic biodiversity in drained forest landscapes. *Hydrobiologia*, 852, 1677–1692. https://doi.org/10.1007/s10750-024-05770-5
13. Khosrovyan, A. (2024). Biodiversity and ecosystem services in rivers. *Water*, 16(15), Article 2091. https://doi.org/10.3390/w16152091
14. Remme, R. P., Meacham, M., Pellowe, K. E., Andersson, E., et al. (2024). Aligning nature-based solutions with ecosystem services in the urban century. *Ecosystem Services*, 66, Article 101610. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2024.101610
15. Sousa, M. C., Martins, R., Simões, N. E., & Feio, M. J. (2025). Ecosystem services of urban rivers: A systematic review. Aquatic Sciences, 87, Article 10. https://doi.org/10.1007/s00027-024-01138-y
16. Hrytsenko, A. V., Vasenko, O. H., Vernichenko, H. A., et al. (2012). Metodyka ekolohichnoi otsinky yakosti poverkhnevykh vod za vidpovidnymy katehoriiamy. UkrNDIEP. (In Ukrainian).
17. Romanenko, V. D., Zhukynskyi, V. M., Oksiiuk, O. P., & Yatsyk, A. P. (1998). Metodyka ekolohichnoi otsinky yakosti poverkhnevykh vod za vidpovidnymy katehoriiamy. SYMVOL-1. (In Ukrainian).
18. MAWeb. (n.d.). Ecosystems. Retrieved from https://maweb.org/ecosystems/
19. Millennium Ecosystem Assessment. (n.d.). Overview of the Millennium Ecosystem Assessment. Retrieved from https://www.millenniumassessment.org/en/About.html
20. Regional Office of Water Resources in Volyn Oblast. Styr. Retrieved from https://vodres.gov.ua/node/1353 (in Ukrainian).
21. Ukrainian Hydrometeorological Center. Retrieved from https://www.meteo.gov.ua/ (in Ukrainian).
22. Derzhavne ahentstvo vodnykh resursiv Ukrainy. Monitorynh ta ekolohichna otsinka vodnykh resursiv Ukrainy. Retrieved from http://monitoring.davr.gov.ua/EcoWaterMon/GDKMap/Index (in Ukrainian).

The article was received by the editors 11.04.2026 The article was revised 13.05.2026
The article is recommended for printing 17.05.2026 This article published 30.05.2026

https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-06
УДК: 504.4.054

М. І. КУЛИК[1], канд. техн. наук, доц.,
доцент кафедри екології та менеджменту довкілля
e-mail: m.kulyk@karazin.ua ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-0605-9367

А. А. ЛІСНЯК[1], канд. с.-г. наук, доц.,
доцент кафедри екології та менеджменту довкілля
e-mail: anlisnyak@karazin.ua ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-5850-7328

А. О. ГЕМБАЧ[1],
студентка
e-mail: gembachnastya@gmail.com ORCID ID: http://orcid.org/0009-0004-4190-8311

[1] *Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна*
Майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

ОЦІНКА ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ ВОД РІЧКИ СІВЕРСЬКИЙ ДОНЕЦЬ В МЕЖАХ ХАРКІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ У 2024 РОЦІ

Мета. Надати оцінку якості поверхневим водам річки Сіверський Донець в межах Харківської області у 2024 році за даними державного моніторингу на основі визначення індексів якості води.

Методи. Аналітичний, модифікованого індексу забруднення води (ІЗВ), комбінаторного індексу забруднення води (КІЗ).

Результати. Проведено аналіз моніторингових даних вод річки Сіверського Донця в межах Харківської області у 2024 році для постів с. Печеніги, с. Есхар, с. Задонецьке за шістьма основними показниками. Визначено, що якість води в Печенізькому водосховищі відноситься до ІІ класу якості за двома методами, але за методом модифікованого ІЗВ характеризується як «чиста», а за методом КІЗ – як «забруднена». Якість води нижче гирла р. Уди, с. Есхар за методом модифікованого ІЗВ відноситься до ІІІ класу якості й характеризується як «помірно забруднена», а за методом КІЗ вода – до IVа класу якості, й характеризується як «дуже брудна». Якість води на пості с. Задонецьке відноситься до ІІІб класу якості за двома методами, але за методом модифікованого ІЗВ характеризується як «помірно забруднена», а за методом КІЗ – як «брудна». У 2024 році порівняно з 2023 роком якість води в Печенізькому водосховищі покращилась, а на посту с. Есхар погіршилась. На посту с. Задонецьке за методом ІЗВ відмічається погіршення якості води, а за методом КІЗ, навпаки, покращення. Гідрохімічними показниками, які визначають якість води є $БСК_5$, сполуки азоту та сульфати.

Висновки. Вздовж водотоку р. Сіверський Донець в межах Харківської області у 2024 році відбуваються зміни якості води. Спостерігається погіршення якості води після впадіння р. Уди, яка піддається значному антропогенному тиску. Якість води в Сіверському Донці варіюється від «чистої» до «помірно забрудненої» за методом модифікованого ІЗВ, а за методом КІЗ від «забруднена» до «дуже брудна».

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *гідрохімічний показник, модифікований індекс забруднення води, комбінаторний індекс забруднення, якість води*

Як цитувати: Кулик М. І. Лісняк А. А., Гембач А. О. Оцінка якості поверхневих вод річки Сіверський Донець в межах Харківської області у 2024 році. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2026. Вип. 34. С. 79-94. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-06

In cites: Kulyk, M. I., Lisnyak, A. A., & Gembach, A. O. (2026). Assessment of surface water quality of the Seversky Donets river within Kharkiv region in 2024. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology,* (34), 79-94. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-06 (in Ukrainian)

© Кулик М. І. Лісняк А. А., Гембач А. О., 2026

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0

Вступ

Життєдіяльність людини тісно пов'язана з наявністю якісної води, забезпеченість водними ресурсами впливає й на економічний розвиток регіону.

Відповідно до Указу Президента України однією з Цілей сталого розвитку України на період до 2030 року є «забезпечення доступності та сталого управління водними ресурсами та санітарією», для забезпечення сталого розвитку економіки, громадянського суспільства і держави [1]. Дана ціль адаптовано до українських реалій з Цілі 6 «Чиста вода та санітарія», яка є однією із 17 Цілей сталого розвитку ухвалених ООН [2]. Слід зазначити, що дана ціль має між секторальний ефект [3].

До 80% потреб питного водопостачання здійснюється за рахунок поверхневих водних об'єктів [4]. Харківська область має низьку забезпеченість водними ресурсами [3, 5, 6]. 70-80 % водопостачання м. Харкова та Харківської області припадає на басейн Сіверського Донця [3, 7]. Близько 70% території області належить до його басейну, це близько 22 тис км^2, на даній місцевості проживало біля 2,5 мільйонів осіб [5, 7, 8, 9].

Річка Сіверський Донець є найбільшою в Харківській області та являється найважливішим джерелом прісної води сходу України. Її загальна довжина в межах області складає 375 км [4-9]. У 2024 році в Харківській області з природних джерел усього забрано 197,0 млн. м^3 води, в тому числі з поверхневих – 176,8 млн. м^3 води, як зазначалось вище переважна більшість води забрано з водних об'єктів басейну р. Сіверського Донця. 75,8 млн. м^3 свіжої води використано на питні і санітарно-гігієнічні потреби, а 103,9 млн. м^3 – на виробничі потреби [6, 10].

Під впливом антропогенних факторів якість поверхневих вод знижується, зокрема через зарегульованість стоку, міське, промислове господарювання, поверхневих стоків з сільськогосподарських угідь, а також внаслідок ведення бойових дій. У 2024 році до поверхневих водних об'єктів в Харківській області усього скинуто 194,9 млн. м^3 зворотних вод, що у 1,25 раз більше ніж у 2023, з них нормативно очищених 116,4 млн. м^3, нормативно чистих без очистки 74,6 млн. м^3 та забруднених 3,9 млн. м^3 [5, 6, 10, 11].

Дослідження екологічного стану річок розглянуто у роботах багатьох науковців як українських, так і закордонних. У роботах [12, 13] надано екологічну оцінку вод української частини р. Дунай та зроблено прогнози якості води. У статті [14] надано екологічну оцінку якості води у Канівському водосховищі. У роботі [15] надана комплексна оцінка якості вод р. Десна за тривали час та проаналізовано вплив військових дій на стан річкової води. Проблемою якості поверхневих вод займаються й закордоном [16-18].

Дослідженням поверхневих водних об'єктів в межах Харківської області присвячена низка робіт. Особлива увага присвячена визначення якості води в річці Сіверський Донець в різні періоди, яка надана в роботах [4, 5, 11, 19, 20] та інших.

Екологічний стан басейну Сіверського Донця також не залишається поза увагою [21-23], так в статті [3] досліджувались водні об'єкти його правобережжя, а в роботі [7] надано екологічну оцінку території басейну за період з 1991 по 2020 роки. Також вивчався стан й окремих річок Лопань [24], Оскіл [25], Уди [26].

Державний моніторинг стану поверхневих водних об'єктів здійснюється в системі Державного агентства водних ресурсів України [5, 27]. На території Харківської області у 2024 році моніторинг р. Сіверський Донець проводився Регіональним офісом водних ресурсів у Харківській області на 7 пунктах спостереження та Харківським регіональним центром з гідрометеорології на 3 пунктах спостереження [6].

Метою роботи є надати оцінку якості поверхневим водам річки Сіверський Донець в межах Харківської області у 2024 році за даними державного моніторингу на основі визначення індексів якості води.

Об'єкти та методи дослідження

Для дослідження якості поверхневих вод р. Сіверський Донець використано дані Харківського регіонального центру з гідрометеорології за 2024 рік [28]. Державний моніторинг поверхневих вод Сіверського Дінця складався з щомісячного спостереження

за гідрохімічними показниками на трьох постах розташованих у селах Печеніги (Печенізьке водосховище), Есхар (нижче гирла р. Уди) та Задонецьке (рис. 1).

Для проведення оцінки якості поверхневих вод річки Сіверський Донець використовувались наступні методи: збір та аналіз відкритих даних про якість води в річці у 2024 році, аналіз величин гідрохімічних показників води та їх порівняння з відповідними значеннями гранично допустимих концентрацій (ГДК) для водойм рибогосподарського призначення, метод модифікованого індексу забруднення води (ІЗВ), метод комбінаторного індексу забруднення води (КІЗ) [5, 29-31].

Відповідно до методу модифікованого індексу забруднення води, якість води оцінюється за шістьма показниками, з них два є обовя′зкові (розчинений кисень та $БСК_5$), а чотири обирають зі списку [31]. Даний метод відноситься до найпростіших методів комплексної оцінки якості води й проводиться за обмеженим набором показників, що є його недоліком [30, 31]. Величину індексу розраховують за формулою:

$$ІЗВ = \frac{1}{6}\sum_i^n \frac{C_i}{ГДК_i}, \quad (1)$$

де C_i – середнє арифметичне значення концентрації і-го показника якості води;

$ГДК_i$ – гранично допустима концентрація і-го показника.

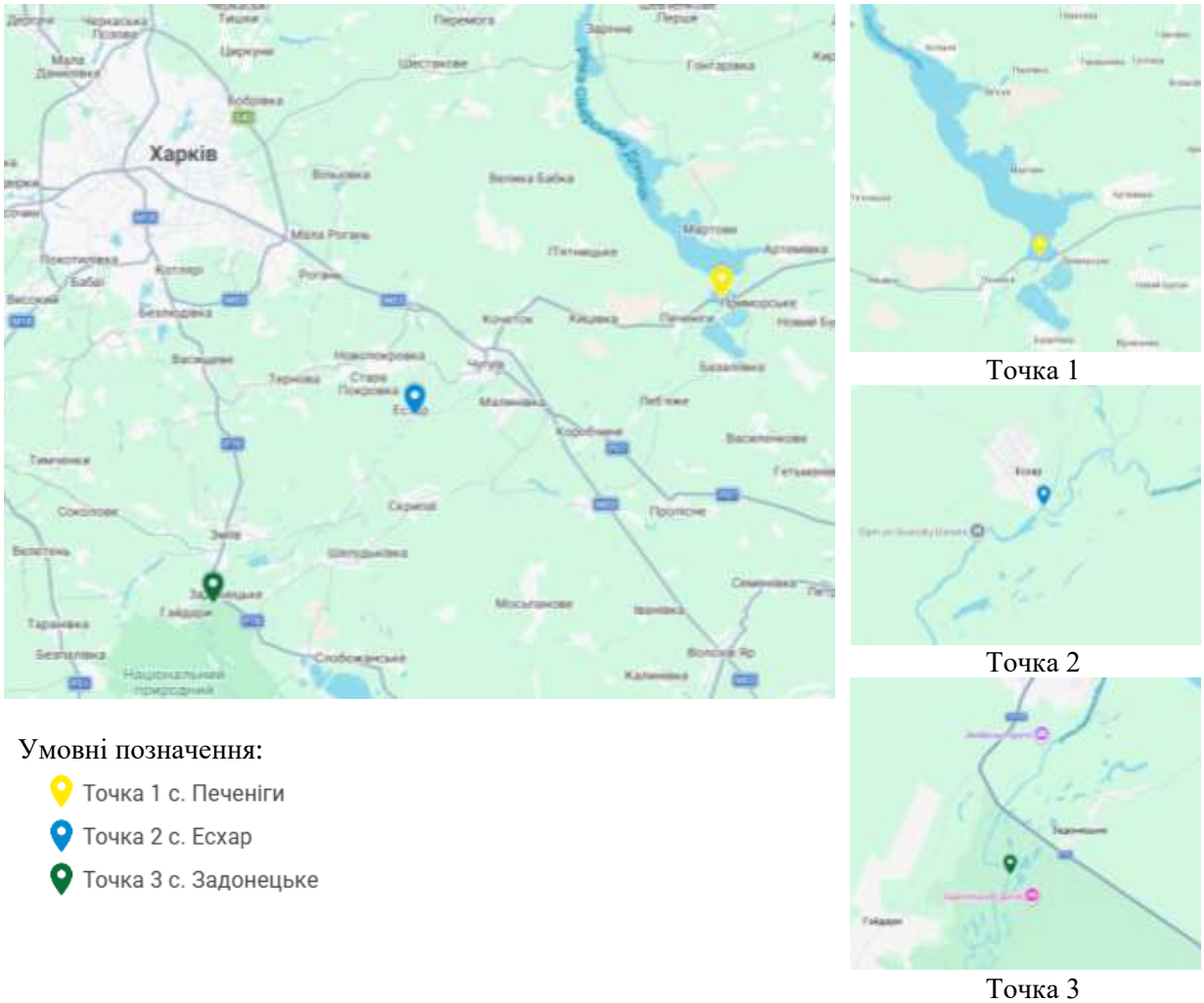


Рис. 1 – Карто-схема гідрологічних постів на річці Сіверський Донець у межах Харківської області

Fig. 1 – Map-scheme of hydrological posts on the Siverskyi Donets River within the Kharkiv region

Якість води у цьому методі оцінюється за величиною ІЗВ й класифікується за класами та характеризується таким чином: І клас якості води ІЗВ ≤ 0,30 й характеризується як «дуже чиста»; ІІ клас якості води ІЗВ від 0,31 до 1,00 й характеризується як «чиста»; ІІІ клас якості води ІЗВ від 1,01 до 2,50 й характеризується як «помірно забруднена»; ІV клас якості води ІЗВ від 2,51 до 4,00 й характеризується як «забруднена»; V клас якості води ІЗВ від 4,01 до 6,00 й характеризується як «брудна»; VI клас якості води ІЗВ від 6,01 до 10,00 й характеризується як «дуже брудна»; VII клас якості води ІЗВ більше 10,00 й характеризується як «надзвичайно брудна» [30, 31].

Відповідно до методу комбінаторного індексу забруднення води, оцінка якості води проводиться у декілька етапів [30, 31]. На першому визначається міра стійкості забруднення (P_i), яка знаходиться за формулою:

$$P_i = \frac{N_{ГДКi}}{N_i}, \quad (2)$$

де $N_{ГДКi}$ – кількість результатів аналізу і-го показника якості води, значення якого перевищує його ГДК;

N_i – загальна кількість результатів аналізу і-го показника якості води.

На другому етапі визначається рівень забруднення, який визначається за кратністю перевищень ГДК (K_i) й знаходиться за формулою:

$$K_i = \frac{C_i}{ГДК_i}. \quad (3)$$

Після того як знайдено міру стійкості забруднення та рівень забруднення визначаються оціночні бали та характеристика забруднення за класифікаційними таблицями. При повторюваності до 10 % присвоюється 1 бал та стійкість забруднення характеризується як «одиночне»; від 10 до 30 % присвоюється 2 бали та забруднення характеризується як «нестійке»; від 30 до 50 – 3 бали та забруднення характеризується як «стійке»; від 50 до 100 % – 4 бали та забруднення характеризується як «характерне». При кратності перевищення ГДК до 2 раз, присвоюється 1 бал, а рівень забруднення характеризується як «низький»; при перевищенні від 2 до 10 разів, присвоюється 2 бал, а рівень забруднення характеризується як «середній»; від 10 до 50 разів – 3 бали, а рівень забруднення характеризується як «високий»; від 50 до 100 разів – 4 бали, а рівень забруднення характеризується як «дуже високий».

Наступним етапом є розрахунок узагальнених оціночних баліів води за кожним показником (S_i), перемножуванням часткових оціночних балів, та визначення стану якості води річки. При значенні узагальнючої оцінки 1 бал якості води водного обєкта за цим показником характеризується як «слабо забрудненна»; при 2 бали якість води характеризується як «забруднена»; при 3 та 4 бали – «брудна»; при 6, 8 та 9 балів – «дуже брудна»; при 12 та 16 балів – «неприпустимо брудна». Якщо значення узагальнючої оцінки більше 11 балів, то цей показник відноситься до лімітуючих показників забруднення (ЛПЗ).

Розраховується величина КІЗ сумуючі узагальнені оціночні бали за усіма n гідрохімічними покаказниками, за формулою:

$$КІЗ = \sum_{i=1}^{n} S_i, \quad (4)$$

Потім знаходиться питомий комбінаторний індекс забруднення води (ПКІЗ), як середнє значення КІЗ. Далі в залежності від величини ПКІЗ та кількості ЛПЗ визначається клас (І – ІV), розряд (а, б, в, г) якості води, визначається характеристика забруднення води водного обєкта («слабо забруднена», «забруднена», «брудна», «дуже брудна») та робиться висновок про придатність води для певного виду водокористування [30, 31].

Результати та обговорення

Дослідження якості води проводилось за даними з трьох гідрологічних постів (рис. 1) за такими гідрохімічними показниками: розчинений кисень, біологічне споживання кисню за п’ять діб ($БСК_5$), азот амонійний, азот нітритний, сульфати, хлориди [28]. Показники обрані відповідно до методики модифікованого ІЗВ [31] та наявними даними.

Аналізуючи результати моніторингу гідрохімічних показників на посту с. Печеніги перевищення ГДК за показником розчинений кисень зафіксовано 1 раз у 1,01 раз у вересні, середнє значення 9,01 мг/м^3; за показником $БСК_5$ зафіковано 6 разів максимально у 1,69 раз у червні, причому середнє значення дорівнює 1,98 мг/м^3, а

медіанне 2,02 мг/м^3, що вище ГДК; за показником азот амонійний зафіксовано 1 раз у 3,09 рази у грудні, середнє значення 0,196 мг/м^3; за показником азот нітритний зафіксовано 2 рази максимально у 1,65 раз у листопаді, середнє значення 0,014 мг/м^3; за показником сульфати перевищення постійне мінімально у 1,15 раз у вересні, максимально у 1,62 раз у серпні, середнє значення 147,08 мг/м^3; за показником хлориди перевищень не зафіковано, середнє значення 40,78 мг/м^3.

Аналізуючи результати розрахунків величини модифікованого індексу забруднення води за формулою (1) можна сказати, що найменше значення ІЗВ 0,54 спостерігається у січні, а найбільше – 1,03 у грудні, середнє – 0,74, а медіанне – 0,70 (рис. 2). Відповідно до критеріїв якості вод за ІЗВ протягом усього року й за середніми значеннями вода відноситься до ІІ класу якості та характеризується як «чиста», окрім грудня коли вода відноситься до ІІІ класу якості й характеризується як «помірно забруднена».

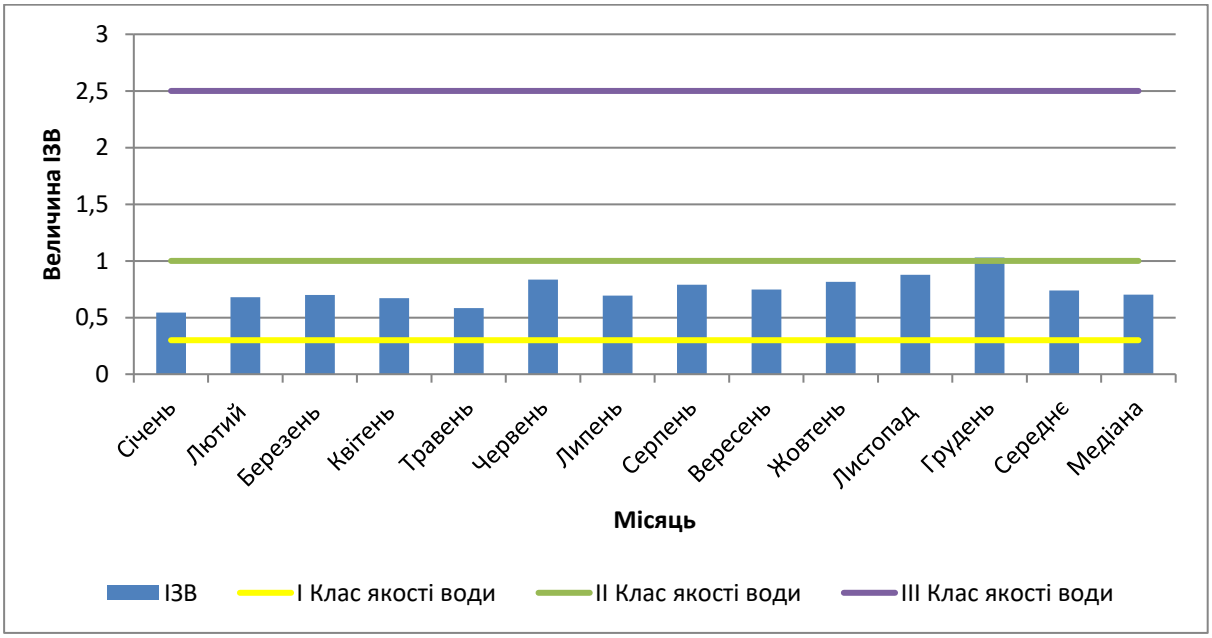


Рис. 2 – Зміни модифікованого ІЗВ у р. Сіверський Донець на посту спостереження с. Печеніги

Fig. 2 – Changes in the modified WPI in the Siverskyi Donets River at the observation post of the village of Pechenyhy

На першому етапі оцінки якості вод за методом комбінаторного індексу забруднення води (табл. 1) виявлено перевищення ГДК за всіма показниками, окрім хлоридів, про що свідчить розрахована за формулою (2) величина повторюваності перевищення. На основі розрахунків визначено часткові оціночні бали, їх величина свідчіть про стійкість забруднення. Для розчиненого кисню, азоту амонійного та хлоридів повторюваність забруднення характеризується як «одиночне». Для азоту нітратного – як «нестійке». Для $БСК_5$ – як «стійке». Для сульфатів – як «характерне».

На другому етапі за формулою (3) визначено величину кратності перевищення нормативу. На основі розрахунків визначено часткові оціночні бали, їх величина свідчіть про рівень забруднення. Кратність перевищення змінюється від 0,136 для хлоридів до 1,471 для сульфатів, але для всіх показників рівень забруднення характеризується як «низький».

Далі розраховано узагальнені оціночні бали для кожного показника, та на основі їх величини визначено якість річкової води. Для розчиненого кисню, азоту амонійного та хлоридів якість води характеризується як «слабо забрудненна». Для азоту нітритного – як «забруднена». Для $БСК_5$ та сульфатів – як «брудна». До лімітуючих показників забруднення не відноситься жоден з гідрохімічних показників.

Наступним етапом за формулою (4) визначено величину комбінаторного індексу забруднення. На посту спостереження с. Печеніги КІЗ дорівнює 12.

Таблиця 1

Результати оцінки якості води у р. Сіверський Донець на посту спостереження с. Печеніги за методом КІЗ

Table 1

Results of water quality assessment in the Siverskyi Donets River at the Pechenyhi village observation post using the CIP method

Показник	Вміст забруднюючих речовин, C_i, мг/дм^3	Повторюваність випадків перевищення ГДК, P_i	Часткові оціночні бали, бал	Кратність перевищення ГДК, K_i	Часткові оціночні бали, бал	Загальні оціночні бали, бал	Характеристика якості води	Лімітуючий показник забруднення води
Розчинений кисень	9,010	0,083	1	0,666	1	1	Слабо забруднена	0
$БСК_5$	1,975	0,500	3	0,988	1	3	Брудна	0
Азот амонійний	0,196	0,083	1	0,503	1	1	Слабо забруднена	0
Азот нітритний	0,014	0,167	2	0,700	1	2	Забруднена	0
Сульфати	147,083	1,000	4	1,471	1	4	Брудна	0
Хлориди	40,783	0,000	1	0,136	1	1	Слабо забруднена	0
КІЗ = $\Sigma \cdot S_i$						12		0
КІЗ = 12, n =6, ПКІЗ = 2,00, 0 ЛПЗ (клас II, забруднена)								

Потім визначено величину питомого КІЗ, яка дорівнює 2,00, та за кількістю ЛПЗ встановлено, що річкова вода відноситься до II класу якості та характеризується як «забруднена».

Аналізуючи результати моніторингу гідрохімічних показників на посту с. Есхар перевищення ГДК за показником розчинений кисень не зафіксовано, середнє значення становить 9,18 мг/м^3; за показником $БСК_5$ зафіковано 10 разів максимально у 5,10 разів у липні, середнє значення дорівнює 4,36 мг/м^3, що перевищує ГДК; за показником азот амонійний зафіксовано 3 рази максимально у 2,53 рази у листопаді, середнє значення 0,40 мг/м^3, що перевищує ГДК, а медіанне 0,30 мг/м^3; за показником азот нітритний перевищення постійне мінімально у 1,10 раз у лютому, максимально у 12,00 разів у червні, середнє значення 0,08 мг/м^3; за показником сульфати перевищення постійне мінімально у 1,70 раз у жовтні, максимально у 2,59 рази у грудні, середнє значення 195,17 мг/м^3; за показником хлориди перевищень не зафіковано, середнє значення 60,22 мг/м^3.

Аналізуючи результати розрахунків величини модифікованого індексу забруднення води за формулою (1) можна сказати, що найменше значення ІЗВ 0,94 спостерігається у лютому, а найбільше – 2,90 у червні, середнє – 1,69, а медіанне – 1,31 (рис. 3). Відповідно до критеріїв якості вод за ІЗВ протягом усього року й за середніми значеннями вода відноситься до III класу якості й характеризується як «помірно забруднена», окрім червня коли вода відноситься до IV класу якості й характеризується як «забруднена».

На першому етапі оцінки якості вод за методом комбінаторного індексу забруднення води (табл. 2) виявлено перевищення ГДК за чотирма показниками, $БСК_5$, азот амонійний, азот нітратний та сульфати, про що свідчить розрахована за формулою (2) величина повторюваності перевищення. На основі розрахунків визначено часткові оціночні бали, їх величина свідчіть про стійкість забруднення. Для розчиненого кисню та хлоридів повторюваність забруднення характеризується як «одиночне». Для азоту амонійного – як «стійке». Для $БСК_5$, азоту нітратного та сульфатів – як «характерне».

На другому етапі за формулою (3) визначено величину кратності перевищення нормативу. На основі розрахунків визначено часткові оціночні бали, їх величина свідчіть про рівень забруднення. Кратність перевищення змінюється від 0,201 для хлоридів до

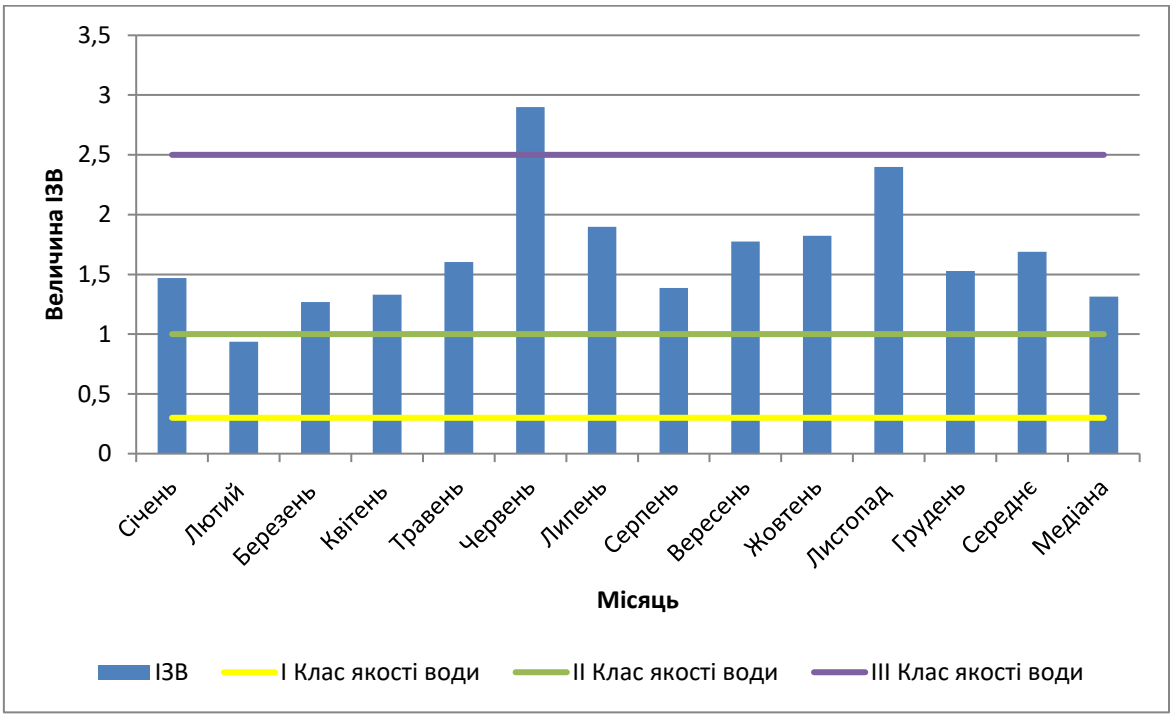


Рис. 3 – Зміни модифікованого ІЗВ у р. Сіверський Донець на посту спостереження с. Есхар

Fig. 3 – Changes in the modified WPI in the Siverskyi Donets River at the observation post of the village of Eskhar

Таблиця 2

Результати оцінки якості води у р. Сіверський Донець на посту спостереження с. Есхар за методом КІЗ

Table 2

Results of water quality assessment in the Siverskyi Donets River at the Eskhar village observation post using the CIP method

Показник	Вміст забруднюючих речовин, C_i, мг/дм^3	Повторюваність випадків перевищення ГДК, P_i	Часткові оціночні бали, бал	Кратність перевищення ГДК, K_i	Часткові оціночні бали, бал	Загальні оціночні бали, бал	Характеристика якості води	Лімітуючий показник забруднення води
Розчинений кисень	9,183	0,000	1	0,653	1	1	Слабо забруднена	0
$БСК_5$	4,358	0,833	4	2,179	2	8	Дуже брудна	0
Азот амонійний	0,403	0,333	3	1,033	1	3	Брудна	0
Азот нітритний	0,082	1,000	4	4,100	2	8	Дуже брудна	0
Сульфати	195,167	1,000	4	1,952	1	4	Брудна	0
Хлориди	60,217	0,000	1	0,201	1	1	Слабо забруднена	0
КІЗ = $\Sigma \cdot S_i$						25		0
КІЗ = 25, n =6, ПКІЗ = 4,17, 0 ЛПЗ (клас IVa, дуже брудна)								

4,100 для азоту нітритного. Для показників розчинений кисень, азот амонійний, сульфати та хлориди рівень забруднення характеризується як «низький», а для показників $БСК_5$ та азот нітритний – як «середній».

Далі розраховано узагальнені оціночні бали для кожного показника, та на основі їх величини визначено якість річкової води. Для розчиненого кисню та хлоридів якість води характеризується як «слабо забрудненна». Для азоту амонійного та сульфатів – як «брудна». Для $БСК_5$ та азоту нітритного – як «дуже брудна». До лімітуючих показників забруднення не відноситься жоден з гідрохімічних показників.

Наступним етапом за формулою (4) визначено величину комбінаторного індексу забруднення. На посту спостереження с. Есхар КІЗ дорівнює 25.

Потім визначено величину питомого КІЗ, яка дорівнює 4,17, та за кількістю ЛПЗ встановлено, що річкова вода відноситься до IV класу якості й має розряд класу якості – а, і характеризується як «дуже брудна».

Аналізуючи результати моніторингу гідрохімічних показників на посту с. Задонецьке перевищення ГДК за показником розчинений кисень зафіксовано 2 рази максимально у 1,64 раз у червні, середнє значення становить 8,60 мг/м^3; за показником $БСК_5$ зафіковано 9 разів максимально у 2,52 рази у березні, середнє значення дорівнює 2,93 мг/м^3, що перевищує ГДК; за показником азот амонійний зафіксовано 6 разів максимально у 1,63 рази у грудні, середнє значення 0,36 мг/м^3; за показником азот нітритний перевищення постійне мінімально у 1,10 раз у січні, максимально у 10,10 разів у листопаді, середнє значення 0,083 мг/м^3; за показником сульфати перевищення постійне мінімально у 1,60 раз у червні, максимально у 2,40 рази у грудні, середнє значення 185,92 мг/м^3; за показником хлориди перевищень не зафіковано, середнє значення 59,55 мг/м^3.

Аналізуючи результати розрахунків величини модифікованого індексу забруднення води за формулою (1) можна сказати, що найменше значення ІЗВ 1,05 спостерігається у лютому, а найбільше – 2,45 у листопаді, середнє – 1,55, а медіанне – 1,38 (рис. 4). Відповідно до критеріїв якості вод за ІЗВ протягом усього року вода відноситься до ІІІ класу якості й характеризується як «помірно забруднена».

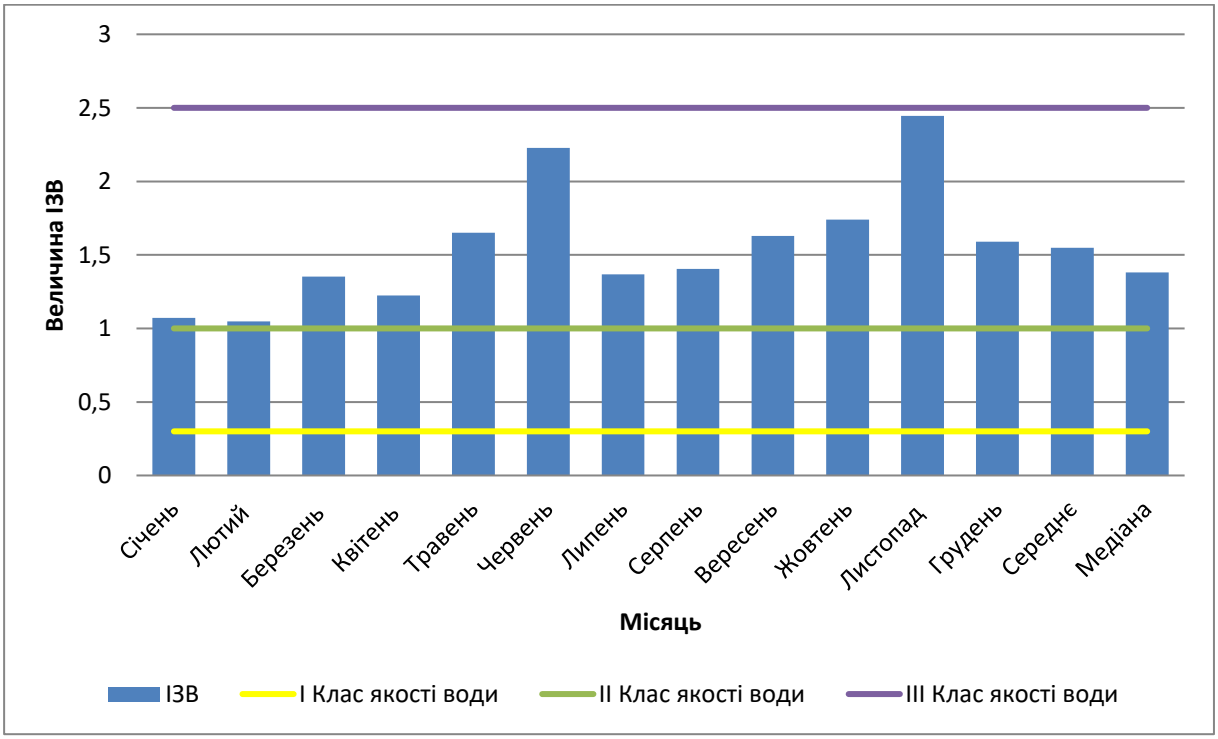


Рис. 4 – Зміни модифікованого ІЗВ у р. Сіверський Донець на посту спостереження с. Задонецьке

Fig. 4 – Changes to the modified WPI in the Siverskyi Donets River at the observation post of the village of Zadonetske

На першому етапі оцінки якості вод за методом комбінаторного індексу забруднення води (табл. 3) виявлено перевищення ГДК за всіма показниками, окрім хлоридів, про що свідчить розрахована за формулою (2) величина повторюваності перевищення. На основі розрахунків визначено часткові оціночні бали, їх величина свідчить про стійкість забруднення. Для розчиненого кисню та хлоридів повторюваність забруднення характеризується як «одиночне». Для азоту амонійного – як «стійке». Для $БСК_5$, азоту нітратного та сульфатів – як «характерне».

На другому етапі за формулою (3) визначено величину кратності перевищення нормативу. На основі розрахунків визначено часткові оціночні бали, їх величина свідчить про рівень забруднення. Кратність перевищення змінюється від 0,199 для хлоридів до 4,150 для азоту нітритного. Для показників розчинений кисень, $БСК_5$, азот амонійний, сульфати та хлориди рівень забруднення характеризується як «низький», а для показника азот нітритний – як «середній».

Далі розраховано узагальнені оціночні бали для кожного показника, та на основі їх величини визначено якість річкової води. Для розчиненого кисню та хлоридів якість води характеризується як «слабо забрудненна». Для $БСК_5$, азоту амонійного та сульфатів – як «брудна». Для азоту нітритного – як «дуже брудна». До лімітуючих показників забруднення не відноситься жоден з гідрохімічних показників.

Таблиця 3

Результати оцінки якості води у р. Сіверський Донець на посту спостереження с. Задонецьке за методом КІЗ

Table 3

Results of water quality assessment in the Siverskyi Donets River at the Zadonetske village observation post using the CIP method

Показник	Вміст забруднюючих речовин, C_i, мг/дм^3	Повторюваність випадків перевищення ГДК, P_i	Часткові оціночні бали, бал	Кратність перевищення ГДК, K_i	Часткові оціночні бали, бал	Загальні оціночні бали, бал	Характеристика якості води	Лімітуючий показник забруднення води
Розчинений кисень	8,600	0,083	1	0,698	1	1	Слабо забруднена	0
$БСК_5$	2,927	0,750	4	1,464	1	4	Брудна	0
Азот амонійний	0,362	0,500	3	0,928	1	3	Брудна	0
Азот нітритний	0,083	1,000	4	4,150	2	8	Дуже брудна	0
Сульфати	185,917	1,000	4	1,859	1	4	Брудна	0
Хлориди	59,550	0,000	1	0,199	1	1	Слабо забруднена	0
КІЗ = $\Sigma \cdot S_i$						21		0
КІЗ = 21, n =6, ПКІЗ = 3,50, 0 ЛПЗ (клас IIIб, брудна)								

Наступним етапом за формулою (4) визначено величину комбінаторного індексу забруднення. На посту спостереження с. Задонецьке КІЗ дорівнює 21.

Потім визначено величину питомого КІЗ, яка дорівнює 3,50, та за кількістю ЛПЗ встановлено, що річкова вода відноситься до III класу якості й має розряд класу якості – б, й характеризується як «брудна».

Аналізуючи зміни величини модифікованого індексу забруднення води вздовж річки Сіверський Донець в межах Харківської області (рис. 5) можна відмітити, що після впадіння річки Уди якість води погіршується у всіх місяцях, за середнім значенням у 2,28 рази, а за медіанним у 1,87 раз. Далі ситуація не однозначна, так у січні, квітні, червні, липні, вересні, жовтні й за середніми значеннями ІЗВ у 1,09 раз якість води покращується, що відмічалось і в інших роботах [22]. Разом з тим в інші місяці лютому, березні, травні, серпні, листопаді, грудні й за медіанними значеннями у 1,05 раз, навпаки, якість води погіршується.

Аналізуючи зміни середніх величин модифікованого ІЗВ вздовж річки Сіверський Донець в межах Харківської області у 2024 році порівняно з 2023 роком (рис. 6)

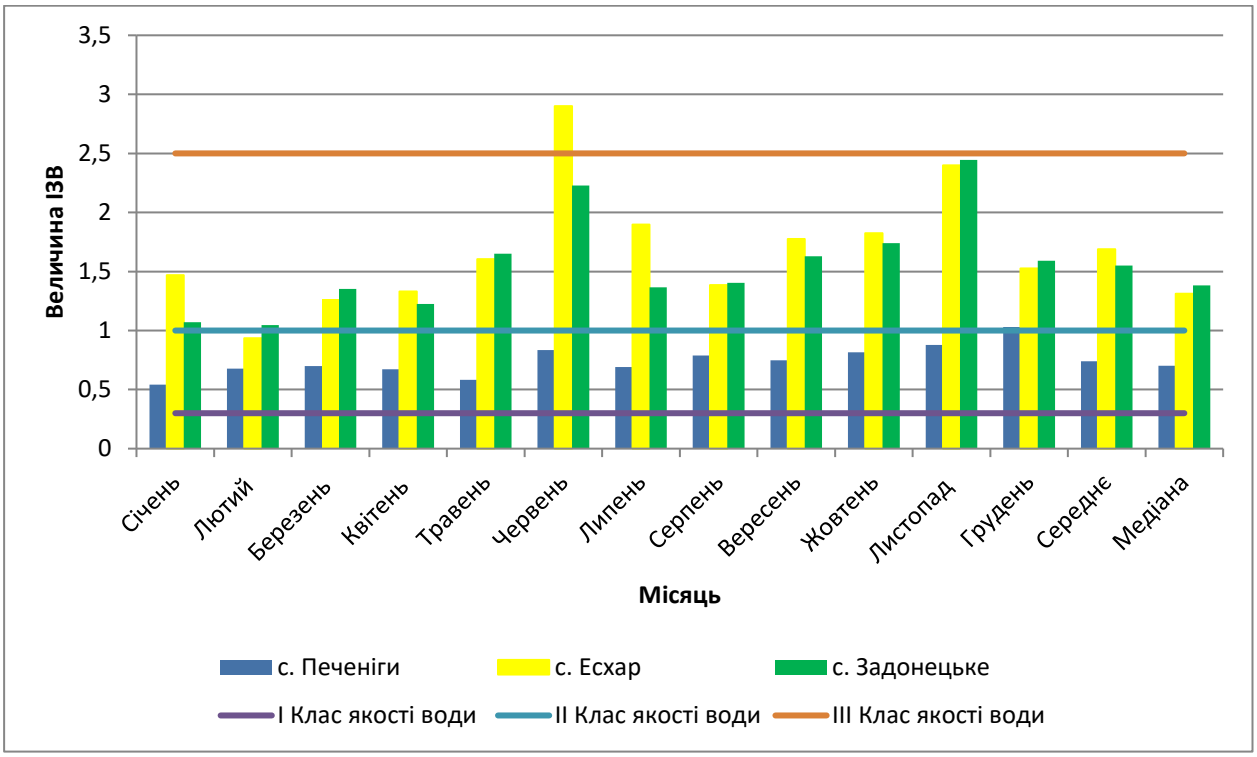


Рис. 5 – Зміни модифікованого ІЗВ вздовж водотоку р. Сіверський Донець у 2024 року

Fig. 5 – Changes to the modified WPI along the Siverskyi Donets River in 2024

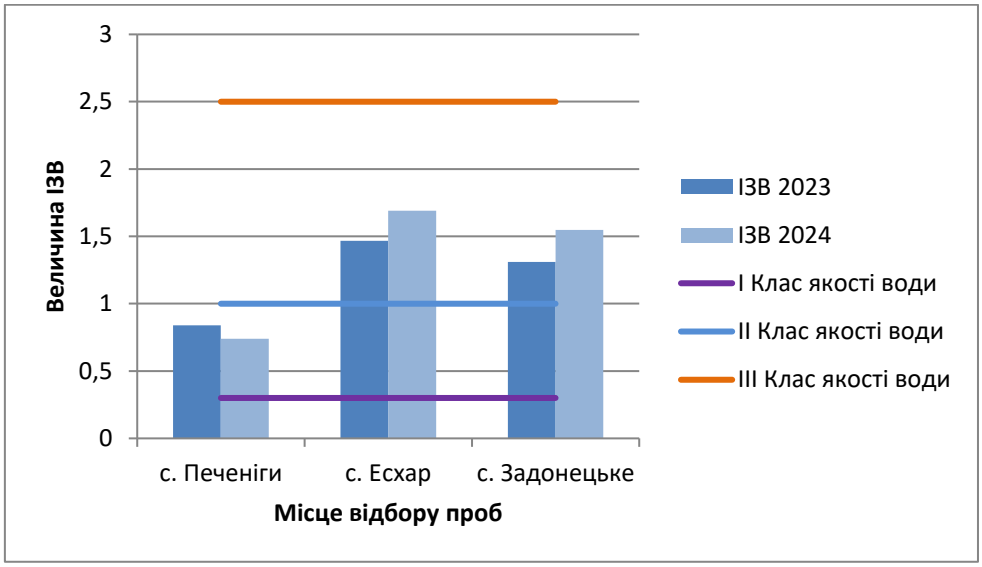


Рис. 6 – Зміни модифікованого ІЗВ вздовж водотоку р. Сіверський Донець у 2023 та 2024 роках

Fig. 6 – Changes to the modified WPI along the Siverskyi Donets River in 2023 and 2024

можна відмітити, що в пункті спостереження с. Печеніги якість води покращилась у 1,13 раз, а в пунктах спостереження с. Есхар та с. Задонецьке якість води погіршилась у 1,15 та у 1,18 раз, відповідно. Разом з тим клас якості води за ІЗВ не змінився.

Слід зазначити, що у Харківській області у 2024 у році середньорічна температура виявилась найвища за декілька десятиліть та з найменшою кількістю опадів. Середня по області річна кількість опадів становила 61 % від кліматичної норми [32]. Це

стало однією з причин найнижчого за останні 62 роки рівня води в р. Сіверський Донець [33]. Разом з цим, у другій та третій декаді червня пройшли короткочасні інтенсивні зливи [34]. У третій декаді листопада пройшли значні опади, переважно у вигляді дощу [35]. Як відомо, інтенсивні опади сприяють змиву забруднюючих речовин поверхневим стоком, що вірогідно стало причиною погіршення якості води у річці в ці місяці.

Аналізуючи зміни величини питомого комбінаторного індексу забруднення води вздовж річки Сіверський Донець в межах Харківської області у 2024 році (рис. 7) можна відмітити, що після впадіння річки Уди якість води погіршується у 2,09 рази, а далі спостерігається покращення якості води у 1,19 раз, що спостерігалось за середнім значенням модифікованого ІЗВ та в інших роботах [22]. Зазначимо, що р. Уди проходить урбанізованою територією й піддається значному антропогенному тиску.

Аналізуючи зміни величин ПКІЗ вздовж річки Сіверський Донець в межах Харківської області у 2024 році порівняно з 2023 роком (рис. 7) можна відмітити, що в пунктах

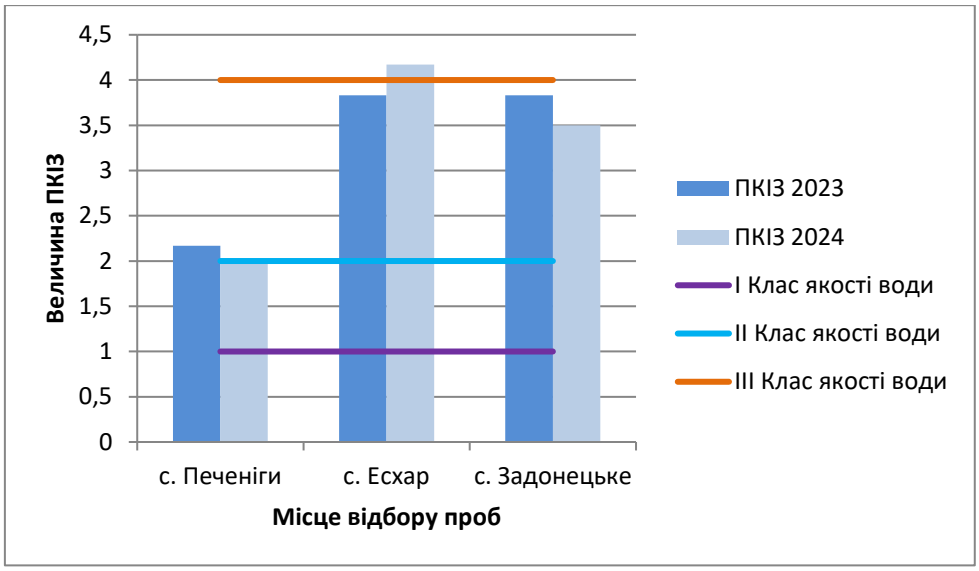


Рис. 7 – Зміни ПКІЗ вздовж водотоку р. Сіверський Донець у 2023 та 2024 роках

Fig. 7 – Changes to specific CIP along the Siverskyi Donets River in 2023 and 2024

спостереження с. Печеніги та с. Задонецьке якість води покращилась у 1,08 та 1,10 раз, відповідно, а в пункті спостереження с. Есхар якість води погіршилась у 1,09 раз. Дані зміни привели й до зміни класу якості води, так в с. Печеніги вода стала відноситься до II класу якості й характеризується як «забруднена».

В с. Есхар вода стала відноситься до IV класу якості й має розряд класу якості – а, і характеризуватися як «дуже брудна». В с. Задонецьке клас якості води не змінився.

Висновки

Оцінка якості води річки Сіверський Донець в межах Харківської області у 2024 році за двома комплексними індексами (модифікованого індексу забруднення води та комбінаторного індексу забруднення води) показала, що річка перебуває під значним антропогенним впливом, рівень якого близький до межі стійкості екосистеми.

За результати розрахунків модифікованого ІЗВ встановлено клас якості води, який змінюється вздовж річки від II «чиста» до III «помірно забруднена».

За величинами показників КІЗ визначено клас якості води вздовж річки, що варіюється від II «забруднена» до IVa «дуже брудна». Гідрохімічними показниками, які визначають якість води є $БСК_5$, сполуки азоту та сульфати.

Погіршення стану води в Сіверському Донці в межах Харківської області спостерігається після впадіння р. Уди, яка піддається

значному антропогенному тиску, далі відбуваються процеси самоочищення та роз-бавлення за рахунок впадінні р. Можливо.

Варто зазначити, що відповідно до показників модифікованого ІЗВ покращення води у с. Задонецьке спостерігається не у всі місяці 2024 року, а навпаки якість води погіршується порівняно з с. Есхар. Можливо на це вплинуло рекордне обміління річки в 2024 році.

Конфлікт інтересів

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів. Крім того, автори дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

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

Декларація про використання ШІ

В роботі не використано ресурс штучного інтелекту.

Список використаної літератури

1. Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року. Указ ПрезидентаУкраїни № 722/2019 від 30.09.2019 року. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722/2019#Text (дата звернення 23.03.2026)
2. 17 Цілей сталого розвитку. Глобальний договір ООН в Україні. URL: https://globalcompact.org.ua/tsili-stijkogo-rozvytku/ (дата звернення 23.03.2026)
3. Rychak N. L., Cherkashyna N. I., Makeiva D. S. Hydrochemical composition features of surface waters of the right-bank part of the Siverskiy Donets basin (Kharkiv region). *Людина та довкілля. Проблеми неоекології.* 2025. Вип. 44. 8-24. https://doi.org/10.26565/1992-4224-2025-44-01
4. Безсонний В. Л. Вибір індикативного показниками екологічного стану поверхневого джерела водопостачання. *Комунальне господарство міст.* 2022. Том 3. Вип. 170. 26-34. https://doi.org/10.33042/2522-1809-2022-3-170-26-34
5. Кулик М. І., Лісняк А. А. Оцінка якості поверхневих вод у річці Сіверський Донець в межах Харківської області у 2023 році. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології.* 2024. Вип. 41. 83-99. https://doi.org/10.26565/1992-4224-2024-41-06
6. Екологічний паспорт Харківської області 2024 рік. Харківська обласна військова адміністрація. URL: https://kharkivoda.gov.ua/oblasna-derzhavna-administratsiya/struktura-administratsiyi/strukturni-pidrozdili/486/2736/132692 (дата звернення 23.02.2026)
7. Решетченко С., Дмітрієв С. Оцінка екологічного річкового басейну Сіверського Дінця у межах Харківської області. *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії.* 2022. Вип. 36. 34-42. : https://doi.org/10.26565/2075-1893-2022-36-04
8. Артерія сходу України. Резюме проблем Сіверського Дінця топ програми заходів для їхнього вирішення. Київ : Видавництво «Компанія ВАІТЕ». 2021. 102 с. URL: https://sdbuvr.gov.ua/pres-centr/publikatsiyi (дата звернення 23.03.2026)
9. Сіверський Донець: Водний екологічний атлас. Власенко О. Г., Гриценко А. В., Карабаш Г. О., Станкевич П. П. та ін. Під ред. Гриценко А. В., Власенко О. Г. Харків : Райдер. 2006. 188 с.
10. Кулик М. І., Гембач А. О. Якість поверхневих вод у річках басейну Сіверського Дінця в межах Харківської області у 2024 році. *Охорона довкілля: збірник наукових статей XXI Всеукраїнських наукових Таліївських читань*. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2025 р. 144 – 147. URI: https://ecology.karazin.ua/wp-content/uploads/2025/11/taliev-2025.pdf
11. Лобода Н. С., Смалій О. В., Катинська І. В., Котович О. М. Оцінка змін якості води по довжині річки Сіверський Донець на початку XXI сторіччя. *Український гідрометеорологічний журнал.* 2018. № 23. 54-68. https://doi.org/0.31481/uhmj.23.2019.06
12. Horoshkova L.A., Menshov O. I., Korniichuk Y. D., Horoshkov S. V., Ryshykov I. V. Ecological assessment of surface water conditions of the Danube river. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2025. Вип. 32. 6 - 22. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2025-32-01
13. Терземан В. В., Юрасов С. М. Прогноз вмісту органічних речовин у водах річки Дунай (Кілія). *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2025. Вип. 32. 61 - 70. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2025-32-04
14. Безсонний В. Л., Некос А. Н., Сапун А. В. Екологічна оцінка якості води Канівського водосховища. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології.* 2022. Вип. 38. 85-96. https://doi.org/10.26565/1992-4224-2022-38-08
15. Horoshkova L. A., Menshov O. I., Korniichuk Y. D., Soloviova A. O. The war anthropogenic impact on the conditions of the Desna river surface waters. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології.* 2025. Вип. 44. 74-93. https://doi.org/10.26565/1992-4224-2025-44-06
16. Uddin M. G. та ін. Performance analysis of the water quality index model for predicting water state using machine learning techniques. *Process Safety and Environmental Protection*. 2023. Vol. 169. 808–828. https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.073

17. Mihali C., Dippong T. Water quality assessment of Remeți watercourse, Maramureș, Romania, located in a NATURA 2000 protected area subjected to anthropic pressure. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2023. Vol. 257. 104216. https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2023.104216
18. Wang J. та ін. Identification of pollution source and prediction of water quality based on deep learning techniques. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2023. Vol. 261. 104287. https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2023.104287
19. Гриценко А. В., Васенко О. Г., Колісник А. В. та ін. Сучасний екологічний стан української частини річки Сіверський Донець (експедиційні дослідження). Харків : ВПП «Контраст». 2011. 340 с.
20. Васенко О. Г., Брук В. В., Карлюк А. А., Свиридов Ю. В. Прогнозування якості води в річках Дунай та Сіверський Донець за допомогою геоінформаційних технологій. *World science*. Poland, 2019. № 11(51). С. 45–136. https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30112019/6766
21. Рибалова О. В., Бригада О В., Ільїнський О. В., Бондаренко О. О. Оцінка стану басейну р. Сіверський Донець в межах Харківської області. *The scientific heritage*. 2020. № 49. С. 27–32. URL: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/12371 (дата звернення 23.03.2026)
22. Васенко О. Г., Ієвлєва О. Ю, Коробкова Г. В., Жук В. М. Формування сучасного гідрохімічного стану басейну річки Сіверський Донець під впливом природних та антропогенних чинників. *Проблеми охорони навколишнього природного середовища та екологічної безпеки.* 2017. Вип. 39. 41–53. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ponp_2017_39_6 (дата звернення 23.03.2026)
23. Коробкова Г. В. Сучасний екологічний стан басейну річки Сіверський Донець в межах Харківської області. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія».* №14. 2016. 66-70. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2016-14-09
24. Крайнюков О. М., Кривицька І. А., Зюзь Т. М. Еколого-токсилогічна оцінка якості води річки Лопань в межах Дергачівського району Харківської області. *Молодий вчений.* 2020. Т. 3 (79). 168-174. https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-3-79-37
25. Бірюков О. В. Гідрохімічний аналіз динаміки змін якості поверхневих вод річки Оскіл. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія».* 3023. Вип. 29. 17-25. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2023-29-02
26. Рибалова О. В., Ільїнський О. В., Бондаренко О. О., Макаров Є. О., Жук В. М. Визначення екологічних нормативів для басейну річки Уди в межах Харківської області. *World Science.* № 1(41), Vol.1, 2019. 36–43. https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/31012019/6296
27. Сіверсько-Донецьке басейнове управління водних ресурсів. Державне агентство водних ресурсів України. Державний моніторинг поверхневих вод. URL: https://sdbuvr.gov.ua/derzhavnyy-monitorynh-poverkhnevykh-vod (дата звернення 23.03.2026)
28. Стан навколишнього природного середовища міста Харків та Харківської області. Харківська обласна військова адміністрація. URL: https://kharkivoda.gov.ua/oblasna-derzhavna-administratsiya/struktura-administratsiyi/strukturni-pidrozdili/486/2736 (дата звернення 23.03.2026)
29. Нормативи екологічної безпеки водних об'єктів, що використовуються для потреб рибного господарства щодо гранично допустимих концентрацій органічних та мінеральних речовин у морських та прісних водах, затверджені наказом Міністерства аграрної політики України від 30.07.2012 № 471. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1369-12#Text (дата звернення 23.03.2026)
30. Сніжко С. І. Оцінка та прогнозування якості природних вод: підручник. Київ: Ніка. Центр. 2001. 264 с.
31. Юрасов С. Н., Кур′янова С. О., Юрасов Н. С. Комплексна оцінка вод за різними методиками та шляхи її вдосконалення. *Український гідрометеорологічний журнал.* 2009. № 5. 42-53. URL: http://uhmj.odeku.edu.ua/wp-content/uploads/2016/08/5-Yurasov-Kurianova.pdf
32. Спека, посуха та вітри: Погодні рекорди Харківщини у 2024 році. URL: https://infocity.kharkiv.ua/obshchestvo/speka-posukha-ta-vitry-pohodni-rekordy-kharkivshchyny-u-2024-rotsi/ (дата звернення 23.03.2026)
33. "Найнижчий рівень води за останні 62 роки": які причини зневоднення Стародубівської греблі та Сіверського Дінця. URL: https://freeradio.com.ua/nainyzhchyi-riven-vody-za-ostanni-62-roky-iaki-prychyny-znevodnennia-starodubivskoi-hrebli-ta-siverskoho-dintsia/ (дата звернення 23.03.2026)
34. Україна: агрометеорологічні умови третьої декади червня 2024 року Укргідрометеоцентр. URL: https://www.apk-inform.com/uk/crop/1542406 (дата звернення 23.03.2026)
35. Україна: агрометеорологічні умови третьої декади листопада 2024 року – Укргідрометеоцентр. URL: https://uga.ua/meanings/ukrayina-agrometeorologichni-umovy-tretoyi-dekady-lystopada-2024-roku-ukrgidrometeotsentr/ (дата звернення 23.03.2026)

Стаття надійшла до редакції 09.04.2026 Переглянуто 10.05.2026
Стаття рекомендована до друку 14.05.2026 Опубліковано 30.05.2026

M. I. KULYK, PhD (Technical),
Associate Professor of the Department of Ecology and Environmental Management
e-mail: m.kulyk@karazin.ua ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-0605-9367

A. A. LISNYAK, PhD (Agriculture),
Associate Professor of the Department of Ecology and Environmental Management
e-mail: anlisnyak@karazin.ua ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-5850-7328

A. O. GEMBACH[1], student
e-mail: gembachnastya@gmail.com ORCID ID: http://orcid.org/0009-0004-4190-8311

[1]*V. N. Karazin Kharkiv National University*
4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

ASSESSMENT OF SURFACE WATER QUALITY OF THE SEVERSKY DONETS RIVER WITHIN KHARKIV REGION IN 2024

Purpose. To provide an assessment of the quality of surface waters of the Siverskyi Donets River within the Kharkiv region in 2024 according to state monitoring data based on the determination of water quality indices.

Methods. Analytical, modified water pollution index (MPI), combinatorial water pollution index (CPI).

Results. An analysis of monitoring data of the Siverskyi Donets River within the Kharkiv region in 2024 was carried out for the posts of the village of Pechenyhi, the village of Eskhar, the village of Zadonetske according to six main indicators. It was determined that the water quality in the Pechenyhi Reservoir belongs to the II quality class according to two methods, but according to the modified MPI method it is characterized as "clean", and according to the CPI method – as "polluted". Water quality below the mouth of the Uda River, the village of According to the modified IZV method, Eschar belongs to the III quality class and is characterized as "moderately polluted", and according to the KIZ method, the water belongs to the IV quality class and is characterized as "very dirty". The water quality at the post of the village of Zadonetske belongs to the III quality class according to two methods, but according to the modified IZV method, it is characterized as "moderately polluted", and according to the KIZ method, it is characterized as "dirty". In 2024, compared to 2023, the water quality in the Pechenizhsky reservoir improved, and at the post of the village of Eschar it deteriorated. At the post of the village of Zadonetske, according to the IZV method, a deterioration in water quality is noted, and according to the KIZ method, on the contrary, an improvement. The hydrochemical indicators that determine water quality are BOD5, nitrogen compounds and sulfates.

Conclusions. Along the watercourse of the Siverskyi Donets River within the Kharkiv region in 2024, changes in water quality occur. Deterioration of water quality is observed after the confluence of the Uda River, which is subjected to significant anthropogenic pressure. Water quality in the Siverskyi Donets varies from "clean" to "moderately polluted" according to the modified IZV method, and from "polluted" to "very dirty" according to the KIZ method.

KEYWORDS: hydrochemical indicator, modified water pollution index, combinatorial pollution index, water quality

Conflict of Interest

The authors declares no conflict of interest regarding the publication of this manuscript. Furthermore, the authors have fully adhered to ethical norms, including avoiding plagiarism, data falsification, and duplicate publication.

Authors Contribution: all authors have contributed equally to this work

AI Statement

The work does not use artificial intelligence resources.

References

1. On the Sustainable Development Goals of Ukraine for the period until 2030. Decree of the President of Ukraine No. 722/2019 dated September 30, 2019. Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722/2019#Text (In Ukrainian)
2. 17 Sustainable Development Goals. UN Global Compact in Ukraine. Retrieved from https://globalcompact.org.ua/tsili-stijkogo-rozvytku/ (In Ukrainian)
3. Rychak, N. L., Cherkashyna, N. I. & Makeiva, D. S. (2025). Hydrochemical composition features of surface waters of the right-bank part of the Siverskiy Donets basin (Kharkiv region). *Man and Environment. Issues of Neoecology*, (44), 8-24. https://doi.org/10.26565/1992-4224-2025-44-01

4. Bezsonny, V. L. (2022). Selection of indicative indicators of the ecological state of a surface water supply source. *Municipal Utilities.* Vol. 3, (170), 26-34. https://doi.org/10.33042/2522-1809-2022-3-170-26-34 (In Ukrainian)
5. Kulyk, M. I. & Lisnyak, A. A. (2024). Assessment of the quality of surface waters in the Siverskyi Donets River within the Kharkiv region in 2023. *Man and Environment. Issues of Neoecology*, (41), 83-99. https://doi.org/10.26565/1992-4224-2024-41-06 (In Ukrainian)
6. Ecological passport of the Kharkiv region 2024. Kharkiv regional military administration. Retrieved from https://kharkivoda.gov.ua/oblasna-derzhavna-administratsiya/struktura-administratsiyi/strukturni-pi-drozdili/486/2736/132692 (In Ukrainian)
7. Reshetchenko, S. & Dmitriev, S. (2022). Assessment of the ecological river basin of the Seversky Donets within the Kharkiv region. *Problems of continuous geographical education and cartography*, (36), 34-42. https://doi.org/10.26565/2075-1893-2022-36-04 (In Ukrainian)
8. Artery of Eastern Ukraine. Summary of the problems of the Seversky Donets River and the top program of measures to solve them. Kyiv: Publishing House "VAITE Company". 2021. 102 p. Retrieved from https://sdbuvr.gov.ua/pres-centr/publikatsiyi (In Ukrainian)
9. Siverskyi Donets: Water Ecological Atlas. Vlasenko, O. G., Hrytsenko, A. V., Karabash, G. O., Stankevych, P. P., etc. Edited by Hrytsenko, A. V., Vlasenko, O. G. Kharkiv: Ryder. 2006. 188 p. (In Ukrainian)
10. Kulyk, M. I. & Gembach, A. O. (2025). Quality of surface waters in rivers of the Siverskyi Donets basin within the Kharkiv region in 2024. *Environmental protection: collection of scientific articles of the XXI All-Ukrainian Scientific Taliiv Readings*. Kharkiv: V. N. Karazin KhNU. 144 – 147. Retrieved from https://ecology.karazin.ua/wp-content/uploads/2025/11/taliev-2025.pdf (In Ukrainian)
11. Loboda, N. S., Smaly, O. V., Katynska, I. V. & Kotovych, O. M. (2018) Assessment of water quality changes along the length of the Siverskyi Donets River at the beginning of the 21st century. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, (23), 54-68. https://doi.org/0.31481/uhmj.23.2019.06 (In Ukrainian)
12. Horoshkova, L.A., Menshov, O. I., Korniichuk, Y. D., Horoshkov, S. V. & Ryshykov, I. V. (2025). Ecological assessment of surface water conditions of the Danube river. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology*, (32), 6-22. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2025-32-0
13. Terzeman, V. V. & Yurasov, S. M. (2025). Forecast of the content of organic substances in the waters of the Danube River (Kiliya). *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology*, (32), 61 - 70. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2025-32-04 (In Ukrainian)
14. Bezsonnyi, V. L., Nekos, A. N. & Sapun, A. V. (2022). Ecological assessment of water quality of the Kaniv reservoir. *Man and environment. Issues of Neoecology*, (38), 85-96. https://doi.org/10.26565/1992-4224-2022-38-08 (In Ukrainian)
15. Horoshkova, L. A., Menshov, O. I., Korniichuk, Y. D. & Soloviova, A. O. (2025). The war anthropogenic impact on the conditions of the Desna river surface waters. *Man and Environment. Issues of Neoecology*, (44), 74-93. https://doi.org/10.26565/1992-4224-2025-44-06
16. Uddin, M.G., Nash, S., Rahman, A., Agnieszka, I. & Olbert, A. I. (2023). Performance analysis of the water quality index model for predicting water state using machine learning techniques. *Process Safety and Environmental Protection*. Vol. 169. 808–828. https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.073
17. Mihali, C. & Dippong, T. (2023). Water quality assessment of Remeți watercourse, Maramureș, Romania, located in a NATURA 2000 protected area subjected to anthropic pressure. *Journal of Contaminant Hydrology*. Vol. 257. 104216. https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2023.104216
18. Wang, J., Xue, B., Wang, Y., Yinglan, A., Wang, G. & Han, D. (2023). Identification of pollution source and prediction of water quality based on deep learning techniques. *Journal of Contaminant Hydrology*. Vol. 261. 104287. https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2023.104287
19. Hrytsenko, A. V., Vasenko, O. H., Kolisnyk, A. V. (2011). Current ecological state of the Ukrainian part of the Siverskyi Donets River (expeditionary studies). Kharkiv : VPP "Kontrast". 340. (In Ukrainian)
20. Vasenko, O. G., Bruk, V. V., Karlyuk, A. A. & Svyrydov, Yu. V. (2019). Forecasting water quality in the Danube and Seversky Donets rivers using geoinformation technologies. *World science*. Poland. 11(51). 45–136. https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30112019/6766 (In Ukrainian)
21. Rybalova, O. V., Brigada, O. V., Ilyinsky, O. V. & Bondarenko, O. O. (2020) Assessment of the state of the Siverskyi Donets River basin within the Kharkiv region. *The scientific heritage*, (49), 27–32. Retrieved from http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/12371 (In Ukrainian)
22. Vasenko, O. G., Ievleva, O. Yu., Korobkova, G. V. & Zhuk, V. M. (2017). Formation of the modern hydrochemical state of the Siverskyi Donets River basin under the influence of natural and anthropogenic factors. *Problems of environmental protection and ecological safety*, (39), 41–53. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ponp_2017_39_6 (In Ukrainian)

23. Korobkova G. V. (2016). Current ecological state of the Siverskyi Donets river basin within the Kharkiv region. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology, (14), 66-70. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2016-14-09 (In Ukrainian)
24. Krainyukov, O. M., Kryvytska, I. A. & Zyuz, T. M. (2020). Ecological and toxicological assessment of water quality of the Lopan River within the Dergach district of Kharkiv region. *Young Scientist.* Vol. 3 (79). https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-3-79-37 (In Ukrainian)
25. Biryukov, O. V. (2023). Hydrochemical analysis of the dynamics of changes in the quality of surface waters of the Oskil River. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology, (29), 17-25. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2023-29-02 (In Ukrainian)
26. Rybalova, O. V., Ilyinsky, O. V., Bondarenko, O. O., Makarov, E. O. & Zhuk, V. M. (2019). Determination of environmental standards for the Uda River basin within the Kharkiv region. *World Science.* 1(41), Vol.1, 36–43. https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/31012019/6296 (In Ukrainian)
27. Severo-Donetsk Basin Water Resources Management. State Agency of Water Resources of Ukraine. State Monitoring of Surface Waters. Retrieved from https://sdbuvr.gov.ua/derzhavnyy-monitorynh-poverkh-nevykh-vod (In Ukrainian)
28. State of the natural environment of the city of Kharkiv and Kharkiv region. Kharkiv Regional Military Administration. Retrieved from https://kharkivoda.gov.ua/oblasna-derzhavna-administratsiya/struktura-administratsiyi/strukturni-pidrozdili/486/2736 (In Ukrainian)
29. Standards for the environmental safety of water bodies used for the needs of fisheries regarding maximum permissible concentrations of organic and mineral substances in sea and fresh waters, approved by order of the Ministry of Agrarian Policy of Ukraine No. 471. (2012, Jul 30). Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1369-12#Text (In Ukrainian)
30. Snizhko, S. I. (2001). Assessment and forecasting of natural water quality: textbook. Kyiv: Nika. Center. 264. (In Ukrainian)
31. Yurasov, S. N., Kurianova, S. O. & Yurasov, N. S. (2009). Comprehensive assessment of waters using various methods and ways of its improvement. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, (5), 42-53. Retrieved from http://uhmj.odeku.edu.ua/wp-content/uploads/2016/08/5-Yurasov-Kurianova.pdf (In Ukrainian)
32. Heat, drought and winds: Weather records of the Kharkiv region in 2024. Retrieved from https://infocity.kharkiv.ua/obshchestvo/speka-posukha-ta-vitry-pohodni-rekordy-kharkivshchyny-u-2024-rotsi/ (In Ukrainian)
33. "The lowest water level in the last 62 years": what are the reasons for the dehydration of the Starodubivska Dam and the Siversky Donets. Retrieved from https://freeradio.com.ua/nainyzhchyi-riven-vody-za-ostanni-62-roky-iaki-prychyny-znevodnennia-starodubivskoi-hrebli-ta-siverskoho-dintsia/ (In Ukrainian)
34. Ukraine: agrometeorological conditions for the third decade of June 2024 – Ukrhydrometeorological Center. Retrieved from https://www.apk-inform.com/uk/crop/1542406 (In Ukrainian)
35. Ukraine: agrometeorological conditions for the third decade of November 2024 – Ukrhydrometeorological Center. Retrieved from https://uga.ua/meanings/ukrayina-agrometeorologichni-umovy-tretoyi-dekady-lystopada-2024-roku-ukrgidrometeotsentr/ (In Ukrainian)

The article was received by the editors 09.04.2026 The article was revised 10.05.2026
The article is recommended for printing 14.05.2026 This article published 30.05.2026

https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-07
УДК 556. 532 (477-924-52)

І. А. КРИВИЦЬКА, канд. біол. наук, доц.,
доцент кафедри зоології та екології тварин
e-mail: krivicka@karazin.ua ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-4727-794X
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

Д. А. ШАБАНОВ, д-р біол. наук, проф.,
завідувач кафедри зоології та екології тварин
e-mail: shabanov@karazin.ua ORSID ID: https://orcid.org/0000-0003-3247-6882
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

К. В. ДАВИДЕНКО, канд. біол. наук
постдокторський дослідник, кафедра мікології та патології лісу
e-mail: kateryna.davydenko@slu.se ORSID ID: https://orcid.org/0000-0001-6077-8533
Шведський університет сільськогосподарських наук, Уппсала,
P.O. Box 7026, SE-750 07 Uppsala, Sweden

О. С. ТРУЩЕНКО
Головний Державний інспектор відділу охорони водних біоресурсів
«Рибоохоронний патруль»
e-mail: oleksandr.trushchenko@student.karazin.ua ORSID ID: https://orcid.org/0009-0006-3147-4331
Управління Державного агентства з розвитку меліорації, рибного господарства
та продовольчих програм у Харківській області
вул. Космічна, буд. 21, кімн. 916, м. Харків, 61145, Україна

ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ЯКОСТІ ВОДИ ТА СТАНУ ІХТІОФАУНИ ПЕЧЕНІЗЬКОГО ВОДОСХОВИЩА

Мета. Проведення оцінки якості поверхневих вод Печенізького водосховища за гідрохімічними та мікробіологічними показниками, а також визначення можливого впливу стану водного середовища на іхтіофауну водойми.

Методи. Польові, аналітичні на визначення показників мікробіологічного та хімічного забруднення поверхневих вод.

Результати. Відбір проб поверхневих вод здійснювали восени 2025 року та навесні 2026 року у чотирьох контрольних створах Печенізького водосховища. У відібраних зразках визначали вміст важких металів (Mn, Fe, Cu, Cr, Pb, Cd) та показники загального мікробного числа (ЗМЧ) із застосуванням сертифікованих лабораторних методів відповідно до чинних нормативно-методичних документів. Отримані результати порівнювали з гранично допустимими концентраціями для оцінки екологічного стану водойми. Встановлено сезонні зміни гідрохімічного та мікробіологічного стану Печенізького водосховища. Навесні 2026 року порівняно з осінню 2025 року зафіксовано зростання концентрацій більшості досліджених важких металів та збільшення показників загального мікробного числа. Найбільші перевищення гранично допустимих концентрацій виявлено для марганцю та загального заліза. Локальні перевищення нормативів також встановлено для міді та кадмію у районі смт Печеніги. Просторовий розподіл забруднювальних речовин свідчить про їх накопичення у нижній частині водосховища. Значення загального мікробного числа навесні суттєво зросли, що вказує на підвищення органічного навантаження та активізацію мікробіологічних процесів у водоймі. Встановлено, що погіршення якості води може створювати несприятливі умови для існування риб, сприяти розвитку бактеріальних, паразитарних і грибкових захворювань та негативно впливати на фізіологічний стан іхтіофауни.

Висновки. Екологічний стан Печенізького водосховища характеризується помірним рівнем забруднення з ознаками посилення антропогенного навантаження у весняний період. Найбільшу екологічну небезпеку становлять підвищені концентрації марганцю та заліза, а також зростання показників загального

© Кривицька І. А., Шабанов Д. А., Давиденко К. В., Трущенко О. С., 2026
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0

мікробного числа. Отримані результати свідчать про необхідність систематичного моніторингу якості води та впровадження природоохоронних заходів для зниження надходження забруднювальних речовин у водосховище.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *водний об'єкт, поверхневі води, забруднення, властивості води, гідрохімічні показники, мікробіологічні показники, біологічний моніторинг, екологічна оцінка*

Як цитувати: Кривицька І. А., Шабанов Д. А., Давиденко К. В., Трущенко О. С. Екологічна оцінка якості води та стану іхтіофауни Печенізького водосховища. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2026. Вип. 34. С. 95-109. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-07

In cites: Kryvytska, I. A., Shabanov, D. A., Davydenko, K. V., & Trushchenko, O. S. (2026). Ecological assessment of water quality and ichthyofauna condition of the Pechenihy reservoir. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology,* (34), 95-109. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-07 (in Ukrainian)

Вступ

Питання якості води є одним із ключових екологічних викликів сучасності, оскільки водні ресурси мають надзвичайно важливе значення для функціонування природних екосистем, життєдіяльності живих організмів та забезпечення потреб населення [1]. Упродовж тривалого часу вода розглядалася як практично невичерпний природний ресурс, однак інтенсивне використання водних об'єктів у промисловості, сільському господарстві та комунальному секторі призвело до суттєвого погіршення їх екологічного стану. Основними джерелами забруднення поверхневих вод є промислові та побутові стічні води, сільськогосподарський стік, надходження органічних відходів, а також недостатньо очищені каналізаційні води [2, 3].

Серед найбільш поширених забруднювачів водного середовища особливе місце займають сполуки азоту та фосфору, надлишкове надходження яких спричиняє розвиток процесів евтрофікації. Значний негативний вплив на якість води також мають пестициди, антибіотики, нафтопродукти та інші токсичні речовини антропогенного походження, що дедалі частіше виявляються у прісноводних екосистемах [3–5]. У результаті порушується природна структура біотичних угруповань, змінюються гідрохімічні показники та знижується екологічна стійкість водойм [6].

Водосховища за своїми характеристиками мають багато спільного з природними озерами, зокрема відзначаються значною акумуляцією водної маси, невеликою швидкістю течії та специфічними гідрологічними умовами [7]. Проте, на відміну від природних озер, водосховища є штучно створеними водними об'єктами, екологічний стан яких значною мірою залежить від антропогенного навантаження. Для таких водойм характерне інтенсивніше накопичення біогенних елементів, що надходять із прилеглих територій разом із поверхневим стоком [8]. Це сприяє розвитку процесів евтрофікації, надмірному росту фітопланктону та порушенню екологічної рівноваги водних екосистем [9–12].

Європейський Союз у 2000 році затвердив Рамкову директиву з водних ресурсів 2000/60/ЄС, спрямовану на стандартизацію систем моніторингу та забезпечення сталого управління водними об'єктами [13]. Одними з основних завдань цієї Директиви є запобігання погіршенню стану водних екосистем, їх захист та покращення екологічного стану [14]. У межах реалізації директиви було впроваджено підходи до оцінки екологічного потенціалу сильно змінених водних об'єктів, зокрема водосховищ.

Важливим компонентом оцінки екологічного стану водойм є визначення мікробіологічних показників якості води. Мікробіологічне забруднення формується внаслідок надходження органічних речовин та неочищених стічних вод, що створює сприятливі умови для розвитку патогенних і умовно-патогенних мікроорганізмів. Підвищення мікробного навантаження негативно впливає на гідробіонтів, зокрема на рибні популяції, та сприяє поширенню інфекційних захворювань риб.

Серед найбільш поширених бактеріальних захворювань риб, пов'язаних із погіршенням мікробіологічного стану водного середовища, виділяють аеромоноз та псевдомоноз. Аеромоноз, збудниками якого є бактерії роду *Aeromonas,* супроводжується розвитком геморагічної септицемії, утворенням виразок та ураженням внутрішніх органів риб. Псевдомоноз, спричинений бактеріями роду *Pseudomonas*, характеризується некро-

тичними ураженнями шкіри, руйнуванням плавників та запальними процесами у зябрах. Крім бактеріальних інфекцій, в умовах забруднення води значного поширення набувають грибкові та паразитарні захворювання, зокрема сапролегніоз, іхтіофтиріоз та дактилогіроз. Мікробіологічне забруднення негативно впливає не лише на епізоотичний стан водойм, але й на загальний фізіологічний стан риб. Надмірний вміст органічних речовин у воді супроводжується зниженням концентрації розчиненого кисню, що призводить до розвитку стресових станів, порушення обмінних процесів та зниження імунної резистентності гідробіонтів. За таких умов навіть умовно-патогенні мікроорганізми можуть набувати високої патогенності та спричиняти масову загибель риб.

Забезпечення населення якісною та безпечною водою залишається однією з найважливіших глобальних проблем сучасності та визначене серед ключових пріоритетів Цілей сталого розвитку ООН, зокрема Цілі № 6 «Чиста вода та належні санітарні умови». Погіршення якості водних ресурсів створює суттєві ризики для здоров'я людей і тварин як через поширення водно-інфекційних захворювань, так і опосередковано — через забруднення харчової продукції патогенними мікроорганізмами, зокрема при використанні неякісної води для зрошення та виробництва харчових продуктів.

Мікробіологічне забруднення води є однією з найсерйозніших екологічних та санітарно-гігієнічних проблем у світі. За оцінками міжнародних організацій, щороку захворювання, пов'язані із забрудненою водою, спричиняють понад 800 тисяч смертей [15]. Крім значних соціальних наслідків, мікробне забруднення водних ресурсів супроводжується суттєвими економічними втратами, які оцінюються приблизно у 12 мільярдів доларів США щорічно [16]. Патогенні мікроорганізми регулярно виявляються у різних типах водного середовища — прісних і морських водах, питній та очищеній воді, а також у стічних водах. Саме мікробне забруднення стало причиною численних спалахів інфекційних захворювань у різних країнах світу, збудниками яких переважно виступають патогенні бактерії, віруси та найпростіші.

У зв'язку з цим особливого значення набуває впровадження сучасних, надійних та швидких методів виявлення мікробіологічного забруднення води, що дозволяють оперативно реагувати на потенційні епідемічні загрози та своєчасно здійснювати необхідні природоохоронні й санітарні заходи.

Підтримання належної якості води є також критично важливим для збереження здоров'я риб та забезпечення стабільного функціонування аквакультурних систем. Мікробні угруповання відіграють подвійне значення у водних екосистемах: з одного боку, вони беруть участь у підтриманні природних процесів самоочищення та стабілізації якості води, а з іншого – можуть виступати джерелом патогенних і умовно-патогенних мікроорганізмів, небезпечних для іхтіофауни [17].

Особливої актуальності проблема набуває в умовах інтенсифікації аквакультури, що супроводжується збільшенням випадків спалахів інфекційних захворювань риб, зокрема вібріозу, пастерельозу та інших бактеріальних патологій [19]. Навіть окремі групи непатогенних мікроорганізмів можуть негативно впливати на стан водних організмів. Наприклад, сульфатвідновлювальні бактерії за анаеробних умов здатні утворювати токсичний сірководень (H_2S), який є небезпечним для риб та інших гідробіонтів [18].

Для оцінки стану здоров'я риб та якості водного середовища дедалі ширше використовуються сучасні методи біологічного контролю, зокрема гістологічні дослідження тканин. Гістологічний аналіз дозволяє виявляти патологічні зміни в організмі риб ще до появи зовнішніх клінічних ознак захворювань, що робить його ефективним інструментом ранньої діагностики порушень у водних екосистемах. Використання кількісних та напівкількісних систем оцінювання гістопатологічних змін дає можливість встановлювати взаємозв'язок між станом риб, умовами вирощування та параметрами якості води [20].

Отже, мікробіологічне та хімічне забруднення водних об'єктів є важливими чинниками деградації водних екосистем і погіршення стану іхтіофауни. Проведення систематичного екологічного моніторингу, контроль якості води та впровадження ефективних природоохоронних заходів є необхідними умовами для збереження біорізноманіття та забезпечення екологічної безпеки водних ресурсів [21].

Методи

Аналітичні дослідження, спрямовані на визначення показників мікробіологічного та хімічного забруднення поверхневих вод Печенізького водосховища, виконані на базі лабораторії еколого-токсикологічних досліджень Навчально-наукового інституту екології, зеленої енергетики та сталого розвитку. Проведення досліджень здійснювалося із застосуванням сучасних аналітичних методів, сертифікованого лабораторного обладнання та відповідно до чинних нормативно-методичних вимог [22].

Одним із основних мікробіологічних показників, що використовувався під час оцінки якості води, було загальне мікробне число (ЗМЧ). Даний показник є важливим індикатором санітарного стану об'єктів довкілля та широко застосовується для оцінки рівня мікробного забруднення води, ґрунтів, харчових продуктів та інших природних і антропогенних середовищ. ЗМЧ характеризує загальну кількість життєздатних мікроорганізмів, здатних утворювати колонії на щільних поживних середовищах за визначених умов культивування.

Методика визначення загального мікробного числа базується на висіві досліджуваного зразка або його серійних розведень на щільне поживне середовище з подальшим інкубуванням та підрахунком колоній, що утворилися. При цьому кожна окрема колонія розглядається як результат розвитку однієї клітини або групи мікроорганізмів, що дозволяє оцінити ступінь мікробного забруднення досліджуваного середовища.

Показник ЗМЧ широко використовується під час проведення санітарно-гігієнічного контролю, оцінки ефективності процесів очищення та дезінфекції, а також у системах екологічного моніторингу водних екосистем. Підвищені значення загального мікробного числа можуть свідчити про наявність значного органічного забруднення та погіршення екологічного стану водного середовища.

Разом із тим, необхідно враховувати, що метод визначення ЗМЧ дозволяє оцінити лише ту частину мікроорганізмів, яка здатна розвиватися за заданих лабораторних умов культивування. У зв'язку з цим фактична чисельність мікробіоти у природному середовищі може бути значно вищою за отримані експериментальні результати.

Результати та обговорення

Печенізьке водосховище належить до найбільших штучних водойм східної частини України та розташоване в межах Харківської області на річці Сіверський Донець. Воно має важливе значення для водогосподарського комплексу регіону, виконуючи функції водопостачання, регулювання річкового стоку, рекреаційного використання та підтримання екологічної рівноваги водних екосистем.

Створення водосховища відбулося у 1960-х роках шляхом спорудження гідротехнічного комплексу з метою накопичення водних ресурсів і забезпечення стабільного водопостачання населення та промислових підприємств, насамперед міста Харкова. Розташування Печенізького водосховища в середній течії річки Сіверський Донець обумовлює особливості його гідрологічного та гідрохімічного режимів, які формуються під впливом природних факторів і антропогенного навантаження.

Площа водного дзеркала водосховища становить близько 86 км², а загальний об'єм водної маси перевищує 380 млн м³. Середня глибина водойми складає 4–5 м, тоді як максимальні глибини в районі греблі досягають приблизно 20 м. Довжина водосховища сягає близько 65 км, що визначає його характерну витягнуту форму, типову для руслових водосховищ.

Гідрологічний режим Печенізького водосховища переважно залежить від водності річки Сіверський Донець, яка є основним джерелом його живлення. Додаткове надходження води відбувається за рахунок приток, атмосферних опадів та підземних вод. Для водосховища характерні сезонні коливання рівня води, пов'язані з весняним водопіллям, літньою меженню та зимовим льодоставом. Максимальні рівні води зазвичай спостерігаються навесні внаслідок інтенсивного танення снігу, тоді як у літньо-осінній період відзначається поступове зниження рівня води.

Температурний режим водойми характеризується вираженою сезонною мінливістю. У теплий період року температура поверхневих шарів води може досягати 22–25 °С, тоді як у зимовий період формується льодовий по-

крив. У більш глибоких шарах можливе виникнення температурної стратифікації, що впливає на перерозподіл розчиненого кисню та інших компонентів у товщі води [23].

Гідрохімічні характеристики водосховища формуються під впливом природних процесів і антропогенної діяльності. Вода Печенізького водосховища належить до помірно мінералізованих вод гідрокарбонатно-кальцієвого типу. До основних показників якості води належать вміст розчиненого кисню, концентрація біогенних елементів (сполук азоту та фосфору), органічних речовин, а також мікробіологічні показники. Істотний вплив на гідрохімічний режим водойми здійснюють скиди стічних вод, поверхневий стік із сільськогосподарських угідь та урбанізованих територій.

Відбір проб поверхневих вод Печенізького водосховища проводився восени 2025 року та навесні 2026 року (рис. 1). У відібраних зразках визначали вміст важких металів та показники загального мікробного числа.

Відбір проб здійснювався у таких точках:

с. Рубіжне — 50.162771, 36.832948;

смт Старий Салтів — 50.078420, 36.808288;

с. Мартове — 49.938087, 36.943507;

смт Печеніги — 49.886795, 36.983333.

Наведені результати (рис. 2) дають можливість оцінити рівень забруднення поверхневих вод важкими металами у різних створах Печенізького водосховища та провести їх порівняння з установленими гранично допустимими концентраціями (ГДК).

Проведений аналіз свідчить, що серед досліджених елементів найбільшу екологічну небезпеку становлять марганець і загальне залізо. Концентрації марганцю у досліджених

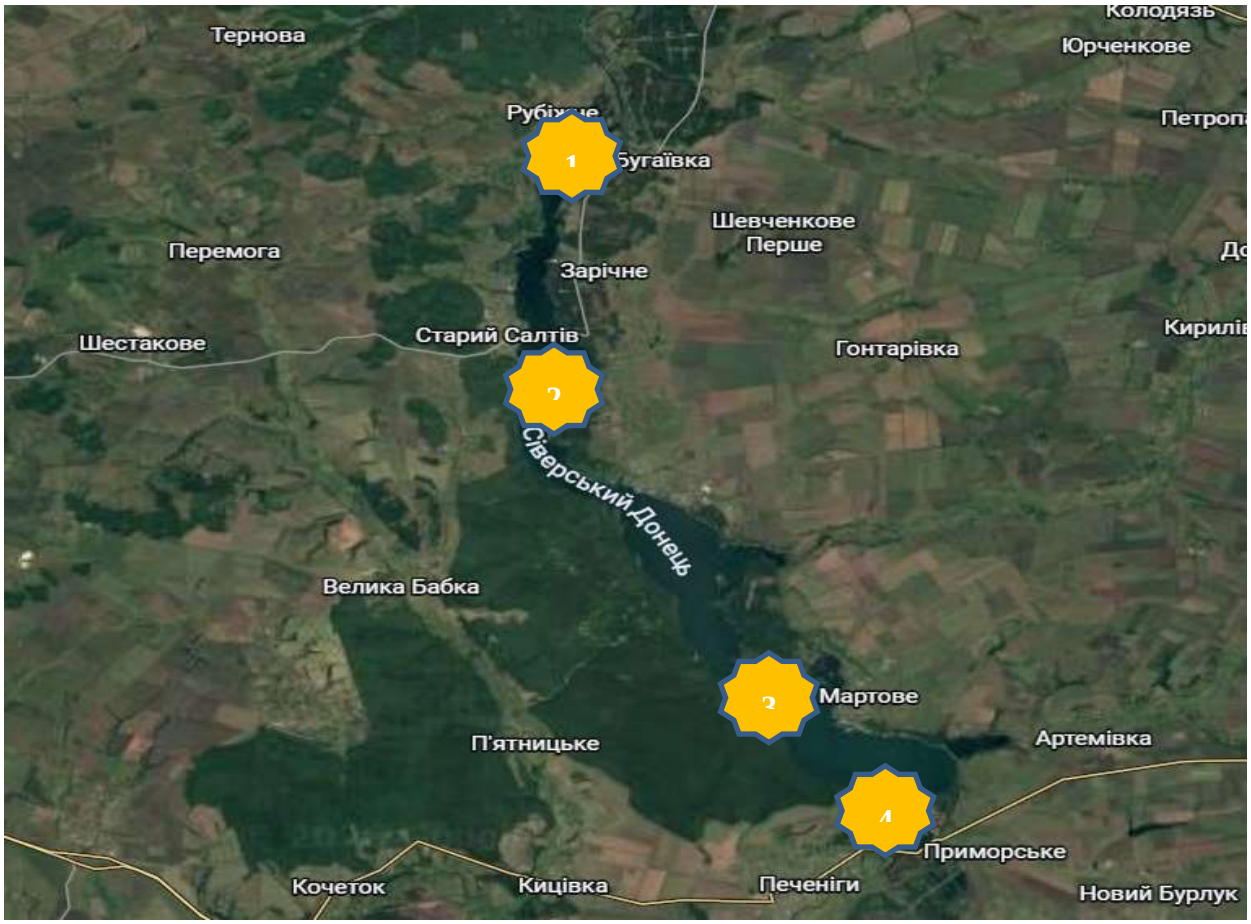


Рис. 1 – Місця відбору зразків води з Печенізького водосховища

Fig. 1 – Sampling locations of water samples from the Pechenihy Reservoir

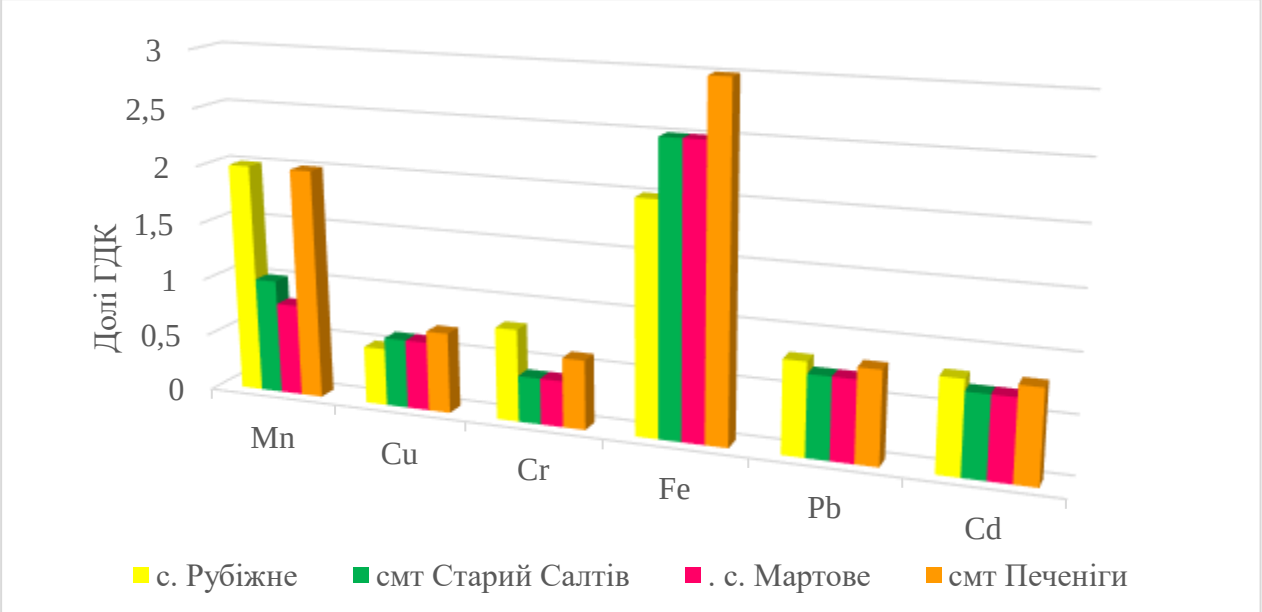


Рис. 2 – Результати визначення концентрацій важких металів у зразках поверхневих вод, які було відібрано з Печенізького водосховища восени 2025 року

Fig. 2 – Results of heavy metal concentration determination in surface water samples collected from the Pechenihy Reservoir in autumn 2025

пробах варіювали в межах 0,04–0,1 мг/л. У створах с. Рубіжне та смт Печеніги зафіксовано перевищення нормативного значення (0,05 мг/л) у 2 рази, що вказує на підвищений вміст даного елемента у водному середовищі. У районі смт Старий Салтів концентрація марганцю перебувала на межі допустимого рівня, тоді як у с. Мартове спостерігались найнижчі значення. Підвищення концентрацій марганцю може бути пов'язане як із природними геохімічними особливостями території, так і з процесами відновлення металів у придонних шарах водойми.

Найбільш суттєві перевищення встановлено для загального заліза. Його концентрації коливалися у межах 0,4–0,6 мг/л при нормативному значенні 0,2 мг/л, що свідчить про перевищення ГДК у 2–3 рази в усіх досліджених створах. Максимальний вміст заліза зафіксований у районі смт Печеніги (0,6 мг/л). Така ситуація може бути зумовлена як природними процесами вимивання залізовмісних сполук із ґрунтів та донних відкладів, так і впливом антропогенних джерел забруднення. Підвищений вміст заліза здатний негативно впливати на органолептичні властивості води та спричиняти вторинні екологічні наслідки для водних екосистем.

Концентрації міді у досліджених пробах становили 0,5–0,7 мг/л, що не перевищує встановлену ГДК (1,0 мг/л). Найвищі значення спостерігались у районі смт Печеніги, що може свідчити про локальний вплив антропогенних чинників. Загалом рівень забруднення води міддю можна оцінити як помірний та такий, що відповідає нормативним вимогам.

Вміст хрому у всіх досліджених створах знаходився в межах 0,02–0,04 мг/л, що є нижчим за гранично допустиму концентрацію (0,05 мг/л). Це свідчить про відсутність суттєвого забруднення водного середовища сполуками хрому та відносно стабільний екологічний стан за даним показником.

Концентрації свинцю та кадмію, незважаючи на їх високу токсичність, були відносно низькими та не перевищували нормативних значень. Вміст свинцю коливався у межах 0,007–0,008 мг/л при ГДК 0,01 мг/л, тоді як концентрації кадмію становили 0,0007–0,0008 мг/л при допустимому рівні 0,001 мг/л. Разом із тим, навіть незначні концентрації цих токсикантів потребують постійного контролю через їх здатність до біоакумуляції та накопичення у донних відкладах і тканинах гідробіонтів.

У просторовому аспекті простежується тенденція до підвищення концентрацій більшості важких металів у напрямку до смт Печеніги, що може бути пов'язано з процесами акумуляції забруднювальних речовин у межах водосховища. Найбільш сприятливий екологічний стан за вмістом важких металів відзначався у створі с. Мартове, де зафіксовані найнижчі концентрації більшості досліджених елементів.

У цілому екологічний стан поверхневих вод Печенізького водосховища за показниками вмісту важких металів можна оцінити як відносно задовільний, однак із окремими ознаками погіршення, пов'язаними з перевищенням нормативів для заліза та марганцю. Незважаючи на те, що концентрації інших металів не перевищували встановлених нормативів, їх присутність у водному середовищі вимагає систематичного моніторингу. Основна екологічна небезпека полягає не лише у поточних концентраціях токсикантів, а й у можливості їх накопичення у донних відкладах та подальшої ремобілізації у водне середовище (рис. 2).

Аналіз отриманих результатів показав, що значення загального мікробного числа (ЗМЧ) у досліджених створах Печенізького водосховища знаходяться в межах 64,1–85,0 КУО/см³, що у перерахунку становить $6{,}4 \times 10^4 – 8{,}5 \times 10^4$ КУО/дм³. Отримані значення свідчать про відносно однорідний та помірний рівень мікробного забруднення водного середовища (табл. 1).

Таблиця 1

Показники загального мікробного числа у досліджених пробах води, які було відібрано восени 2025 року

Table 1

Indicators of total microbial count in the investigated water samples collected in autumn 2025

Створи	Загальне мікробне число (ЗМЧ), КУО/см³	Загальне мікробне число (ЗМЧ), КУО/дм³
с. Рубіжне	71,1 ± 4,13	$7{,}1 \times 10^4$
смт Старий Салтів	455,0 ± 2,19	$4{,}5 \times 10^5$
с. Мартове	73,5 ± 4,29	$7{,}4 \times 10^4$
смт Печеніги	64,1 ± 3,42	$6{,}4 \times 10^4$

Найвищий показник ЗМЧ було зафіксовано у районі смт Старий Салтів (85,0 ± 2,19 КУО/см³), що може бути пов'язано з підвищеним антропогенним навантаженням на дану ділянку водосховища. Ймовірними джерелами впливу є рекреаційна діяльність, близькість населеного пункту, а також можливе надходження побутових стічних вод. Крім того, у цій частині водосховища можуть формуватися умови менш інтенсивного водообміну, що сприяє накопиченню органічних речовин і мікроорганізмів.

У створах с. Рубіжне та с. Мартове значення ЗМЧ були близькими між собою та становили відповідно 71,1 ± 4,13 і 73,5 ± 4,29 КУО/см³, що свідчить про подібні умови формування мікробіологічного стану води. Найнижче значення показника було встановлено у районі смт Печеніги (64,1 ± 3,42 КУО/см³), що може пояснюватися більш інтенсивним водообміном та менш вираженим локальним антропогенним впливом.

З гігієнічної та екологічної точок зору встановлені значення ЗМЧ відповідають водам із помірним рівнем мікробного навантаження. Отримані результати не свідчать про критичне мікробіологічне забруднення, однак вказують на наявність у водному середовищі органічних речовин, що є поживним субстратом для розвитку мікроорганізмів. Підвищення показників у окремих створах може бути пов'язане з локальними джерелами органічного забруднення та впливом антропогенних факторів.

У просторовому аспекті простежується тенденція до зростання мікробного навантаження у районі смт Старий Салтів із подальшим зниженням показників у напрямку до смт Печеніги. Така закономірність може свідчити про прояв процесів природ-

ного самоочищення водосховища, включаючи розбавлення забруднювальних речовин, седиментацію завислих часток та біологічну трансформацію органічних сполук.

Загалом мікробіологічний стан вод Печенізького водосховища можна оцінити як відносно стабільний із помірним рівнем забруднення. Водночас виявлені просторові відмінності підкреслюють необхідність проведення регулярного моніторингу, особливо у створах, що зазнають підвищеного антропогенного впливу.

Умови існування риб у Печенізькому водосховищі за встановлених восени 2025 року показників якості води можна охарактеризувати як загалом сприятливі, однак із наявністю окремих ознак екологічного навантаження. Помірний рівень загального мікробного числа свідчить про відсутність різко вираженого органічного забруднення, що забезпечує підтримання відносно стабільного кисневого режиму та базових умов для нормальної життєдіяльності іхтіофауни. Разом із тим, підвищені концентрації окремих важких металів, насамперед заліза та марганцю, а також наявність токсичних елементів, таких як кадмій і свинець, навіть у низьких концентраціях можуть чинити тривалий хронічний вплив на організм риб.

Подібний вплив проявляється переважно у вигляді фізіологічних порушень: пригнічення обмінних процесів, зниження темпів росту, погіршення функціонування зябрового апарату та ослаблення імунної системи. У таких умовах підвищується ризик розвитку інфекційних та паразитарних захворювань. Серед найбільш поширених бактеріальних хвороб можуть виникати аеромоноз та псевдомоноз, які супроводжуються септичними процесами, утворенням виразок, почервонінням покривів та загальним виснаженням організму риб. За наявності сприятливих умов для розвитку паразитів можливе поширення іхтіофтіріозу («манки»), дактилогірозу та гіродактильозу, що вражають шкіру та зябра риб і суттєво ускладнюють процеси дихання.

У разі ослаблення організму або механічних ушкоджень може розвиватися сапролегніоз — грибкове захворювання, яке проявляється утворенням характерного ватоподібного нальоту на поверхні тіла риб. Крім інфекційних патологій, можливі функціональні порушення, пов’язані з токсичною дією важких металів, зокрема ушкодження зябрового апарату, порушення газообміну, негативний вплив на нервову систему та репродуктивні процеси. Найбільш чутливими до змін якості водного середовища є молодь риб та ікра, для яких навіть незначні коливання гідрохімічних показників можуть мати суттєві наслідки.

Таким чином, екологічний стан Печенізького водосховища загалом забезпечує можливість нормального існування рибних популяцій, однак наявність помірного антропогенного навантаження створює ризики розвитку інфекційних, паразитарних та хронічних токсичних уражень. Це обумовлює необхідність постійного екологічного моніторингу якості води та контролю стану іхтіофауни водосховища.

Результати досліджень вмісту важких металів у поверхневих водах Печенізького водосховища, відібраних навесні 2026 року, свідчать про формування напруженого гідрохімічного стану водойми під впливом природних та антропогенних чинників (рис. 3).

У ході досліджень встановлено підвищений вміст марганцю, концентрації якого у різних створах становили 0,1–0,2 мг/л при нормативному значенні 0,05 мг/л, що відповідає перевищенню у 2–4 рази. Аналогічна тенденція характерна і для загального заліза: його концентрації коливалися у межах 0,6–0,8 мг/л при ГДК 0,2 мг/л, тобто перевищували допустимий рівень у 3–4 рази. Такі показники можуть бути пов’язані як із природними процесами вимивання мінеральних сполук із ґрунтів та донних відкладів, так і з впливом господарської діяльності на водозбірній території.

Концентрації міді у більшості досліджених точок не перевищували встановленого нормативу та знаходилися в межах 0,8–0,9 мг/л. Водночас у районі смт Печеніги було зафіксовано локальне перевищення ГДК — 1,2 мг/л при допустимому значенні 1,0 мг/л, що може свідчити про наявність локального джерела надходження цього елемента у водне середовище.

Вміст хрому у досліджених пробах становив 0,04–0,05 мг/л та наближався до гранично допустимих концентрацій, що вказує на

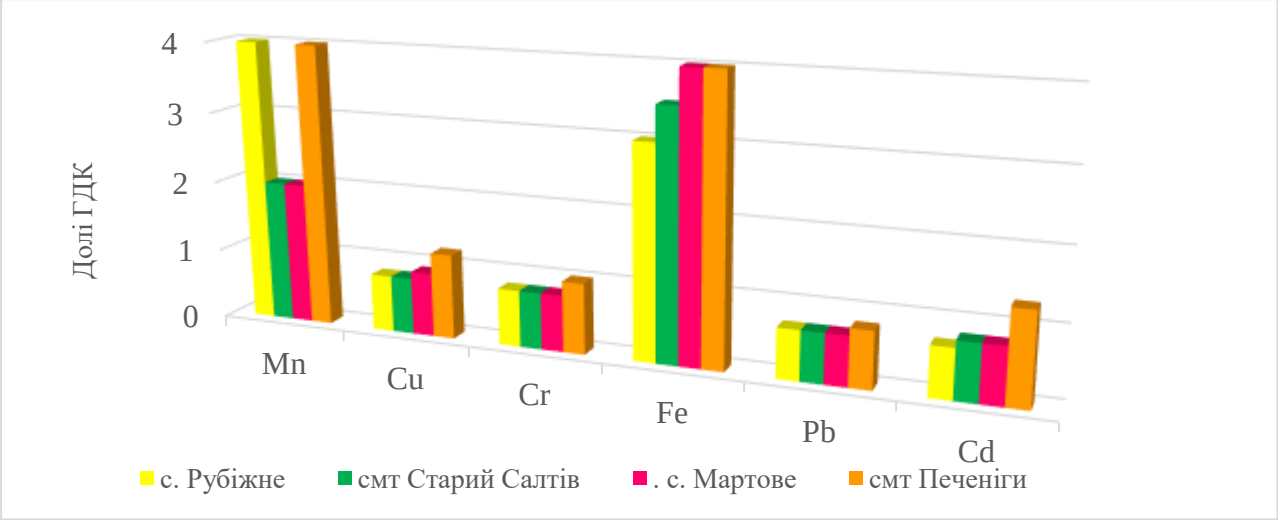


Рис. 3 – Результати визначення концентрацій важких металів у зразках поверхневих вод, які було відібрано з Печенізького водосховища навесні 2026 року

Fig. 3 – Results of Determination of Heavy Metal Concentrations in Surface Water Samples Collected from the Pechenihy Reservoir in Spring 2026

потенційний ризик подальшого погіршення якості води за цим показником у разі зростання антропогенного навантаження.

Концентрації свинцю та кадмію загалом відповідали нормативним вимогам, однак у ряді створів знаходилися поблизу гранично допустимих значень. Особливої уваги потребує вміст кадмію у районі смт Печеніги, де його концентрація становила 0,0013 мг/л при нормативі 0,001 мг/л. Зважаючи на високу токсичність кадмію та його здатність до накопичення у водних організмах і донних відкладах, навіть незначні перевищення можуть становити потенційну екологічну небезпеку.

Просторовий розподіл важких металів свідчить про поступове збільшення їх концентрацій у напрямку нижньої частини водосховища. Найвищі показники за більшістю елементів були встановлені у районі смт Печеніги, що підтверджує роль водосховища як природної зони акумуляції забруднювальних речовин. Така закономірність може бути обумовлена уповільненням течії, активізацією процесів седиментації та накопиченням забруднювачів у донних відкладах.

У цілому екологічний стан поверхневих вод Печенізького водосховища за показниками вмісту важких металів можна оцінити як помірно забруднений із ознаками нестабільного гідрохімічного режиму. Систематичні перевищення нормативів для заліза та марганцю, а також локальні випадки підвищеного вмісту міді та кадмію свідчать про необхідність проведення постійного екологічного моніторингу та впровадження заходів, спрямованих на зменшення надходження забруднювальних речовин у водосховище.

Отримані навесні 2026 року результати визначення загального мікробного числа у водах Печенізького водосховища (табл.2) свідчать про суттєве погіршення мікробіологічного стану водойми та формування високого органічного навантаження Значення ЗМЧ знаходилися в межах 635,1–783,5 КУО/см³, що у перерахунку становить $6{,}4\times10^5$ – $7{,}8\times10^5$ КУО/дм³. Такі показники значно перевищують рівні, характерні для відносно чистих поверхневих вод, і вказують на активізацію процесів мікробіологічної трансформації органічних речовин.

Мінімальні значення ЗМЧ були встановлені у створі с. Рубіжне, тоді як максимальні концентрації зафіксовано у районі с. Мартове. У створах смт Старий Салтів та смт Печеніги показники також залишалися стабільно високими, що свідчить не про локальний, а про загальноакваторний характер мікробіологічного забруднення водосховища. Просторовий

Таблиця 2

Показники загального мікробного числа у досліджених пробах води, які було відібрано навесні 2026 року

Table 2

Indicators of Total Microbial Count in the Investigated Water Samples Collected in Spring 2026

Створи	Загальне мікробне число (ЗМЧ), КУО/см^3	Загальне мікробне число (ЗМЧ), КУО/дм^3
с. Рубіжне	635,1 ± 2,54	6,4х 10^5
смт Старий Салтів	687,0 ± 2,24	6,9 х 10^5
с. Мартове	783,5 ± 2,21	7,8 х 10^5
смт Печеніги	755,2 ± 1,32	7,6 х 10^5

розподіл показників демонструє тенденцію до посилення мікробного навантаження у центральній та нижній частинах водойми, що може бути пов'язано з накопиченням органічних речовин, уповільненням водообміну та інтенсифікацією біохімічних процесів у водній товщі.

Невеликі значення похибок вимірювань свідчать про високу достовірність отриманих результатів та підтверджують стабільність сформованого мікробіологічного режиму. Високі концентрації ЗМЧ можуть вказувати на надходження у водосховище недостатньо очищених стічних вод, поверхневого змиву органічних речовин із прилеглих територій, а також активізацію процесів евтрофікації в умовах весняного водопілля та підвищення температури води.

З екологічної точки зору такі показники свідчать про наявність значної кількості легкоокиснюваної органічної речовини та активний розвиток мікроорганізмів, що супроводжується збільшенням біохімічного споживання кисню. У подібних умовах підвищується ризик локального дефіциту розчиненого кисню, особливо у придонних шарах, що негативно впливає на функціонування водних екосистем.

Зафіксовані високі значення загального мікробного числа у поєднанні з підвищеним вмістом окремих важких металів формують для іхтіофауни Печенізького водосховища напружені екологічні умови. Такий стан не обов'язково супроводжується масовою загибеллю риб, однак створює виражений фізіологічний стрес та підвищує ризик розвитку інфекційних і паразитарних захворювань. Інтенсивне органічне забруднення сприяє розвитку умовно-патогенної мікрофлори, а токсична дія металів додатково пригнічує імунну систему та порушує обмінні процеси.

У таких умовах найбільш ймовірним є розвиток бактеріальних захворювань, зокрема аеромонозу та псевдомонозу, які супроводжуються септичними процесами, утворенням виразок, геморагіями та загальним виснаженням організму риб. Погіршення якості води також створює сприятливі умови для поширення паразитарних інвазій, зокрема іхтіофтіріозу, дактилогірозу та гіродактильозу. Ослаблення організму риб і механічні ушкодження можуть сприяти розвитку вторинних грибкових інфекцій, зокрема сапролегніозу.

Окрему небезпеку становить тривалий вплив важких металів. Підвищений вміст заліза та марганцю здатний викликати подразнення і закупорювання зябрового апарату, що призводить до порушення газообміну. Свинець і кадмій, навіть у невеликих концентраціях, характеризуються здатністю до накопичення у тканинах риб, спричиняючи хронічні інтоксикації, ураження нервової системи та порушення репродуктивних функцій.

У результаті формується комплексний синдром екологічного стресу, який проявляється зниженням темпів росту, погіршенням поведінкових реакцій, пригніченням репродуктивних процесів та підвищенням смертності молоді й ікри. Найбільш чутливими до змін якості водного середовища залишаються ранні стадії розвитку риб, для яких навіть незначні відхилення гідрохімічних та мікробіологічних показників можуть мати критичні наслідки.

Порівняльна оцінка показників осені 2025 року та весни 2026 року свідчить про чітко виражену сезонну динаміку погіршення екологічного стану водосховища. Навесні від-

булося суттєве зростання як мікробного навантаження, так і концентрацій більшості досліджених металів.

Подібні зміни можуть бути пов'язані з таненням снігу, посиленням поверхневого стоку та активізацією біогеохімічних процесів у водоймі. Крім того, сезонне підвищення температури води та збільшення кількості органічних речовин створюють сприятливі умови для розвитку вторинних інфекцій та посилення евтрофікаційних процесів. Найбільш вразливими до таких змін є молодь риб та ікра, у яких можливі порушення ембріонального розвитку, підвищення смертності та зниження виживаності популяцій.

Отже, сезонна динаміка мікробіологічного та гідрохімічного стану Печенізького водосховища безпосередньо впливає на фізіологічний стан іхтіофауни та рівень захворюваності риб. Якщо восени умови існування можна було оцінити як відносно стабільні, то навесні формується значно вищий ризик розвитку бактеріальних, паразитарних і грибкових патологій. Це свідчить про необхідність посилення екологічного моніторингу та врахування сезонного фактору при оцінці стану водних екосистем.

Висновки

Печенізьке водосховище належить до найбільших штучних водойм східної частини України та розташоване на річці Сіверський Донець у межах Харківської області. Водосховище має важливе господарське та екологічне значення, виконуючи функції водопостачання, регулювання стоку, рекреаційного використання та підтримання екологічної рівноваги регіону.

Дослідження вмісту важких металів і показників загального мікробного числа у відібраних пробах води здійснювалися у лабораторії еколого-токсикологічних досліджень Навчально-наукового інституту екології, зеленої енергетики та сталого розвитку.

Загальне мікробне число (ЗМЧ) є одним із базових мікробіологічних показників, який використовується для оцінки санітарно-екологічного стану довкілля, зокрема водних об'єктів, характеризує кількість життєздатних мікроорганізмів, здатних формувати колонії на поживних середовищах за визначених умов культивування, та є важливим індикатором рівня органічного і мікробіологічного забруднення.

У весняний період 2026 року порівняно з осінню 2025 року спостерігалося погіршення гідрохімічного стану водосховища, що проявлялося підвищенням концентрацій більшості досліджених важких металів та збільшенням кількості випадків перевищення гранично допустимих концентрацій. Подібна динаміка, ймовірно, пов'язана з весняним таненням снігу, активізацією поверхневого стоку та інтенсифікацією біогеохімічних процесів у водному середовищі. Отримані результати свідчать про необхідність урахування сезонних особливостей при оцінці екологічного стану водосховища та посилення моніторингових досліджень у весняний період.

Результати визначення загального мікробного числа у воді Печенізького водосховища свідчать про виражену сезонну мінливість мікробіологічного стану водойми та формування більш напружених екологічних умов навесні 2026 року. Встановлені зміни мікробіологічних показників безпосередньо впливають на умови існування іхтіофауни та характер поширення захворювань риб у різні сезони року.

В осінній період, за помірного рівня мікробного навантаження, захворюваність риб переважно мала фоновий характер і була пов'язана з природною присутністю умовно-патогенної мікрофлори та паразитів. У цей час частіше спостерігалися окремі випадки паразитарних уражень, зокрема дактилогірозу та гіродактильозу, які локалізуються на шкірі та зябрах риб, однак їх розвиток стримувався відносно стабільними умовами середовища та достатнім рівнем резистентності організмів.

Конфлікт інтересів

Автори засвідчують, що, незважаючи на те, що окремі автори статті є членами редакційної колегії цього журналу, процес рецензування, прийняття рішення щодо публікації та редагування проводилися незалежно, без їхньої участі чи впливу. Будь-які потенційні конфлікти інтересів були повністю усунені шляхом зовнішнього контролю процесу. Крім

того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

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

Декларація про використання ШІ

Технології штучного інтелекту (ChatGPT) застосовувалися виключно як допоміжний інструмент для мовного редагування та вдосконалення оформлення наукового матеріалу. Усі наукові інтерпретації, аналіз результатів та висновки виконані авторами самостійно.

Список використаної літератури

1. Jackson, R.B., Carpenter, S.R., Dahm, C.N., McKnight, D.M., Naiman, R.J., Postel, S.L., Running, S.W. *Water in a Changing World. Ecol. Appl.* 2001. Vol. 11, P. 1027–1045. https://doi.org/10.1890/1051-0761(2001)011[1027:WIACW]2.0.CO;2
2. Wada, Y., Graaf, I., Beek, L. High-Resolution Modeling of Human and Climate Impacts on Global Water Resources. J. Adv. Model. Earth Syst. 2014. Vol. 6, P. 513–526. https://doi.org/10.1002/2014MS000322
3. Rodrigues, S., Pinto, I., Martins, F., Formigo, N., Antunes, S.C. Can Biochemical Endpoints Improve the Sensitivity of the Biomonitoring Strategy Using Bioassays with Standard Species, for Water Quality Evaluation? Ecotoxicol. Environ. Saf. 2021. Vol. 215, 112151. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112151
4. World Water Assessment Programme. The United Nations World Water Development Report 3: Water in a Changing World. UNESCO: Paris, France; Earthscan: London, UK, 2009. ISBN 978-1-84407-840-0.
5. Diogo, B.S., Rodrigues, S., Silva, N., Pinto, I., Antunes, S.C. Evidence for Links between Feeding Behavior of Daphnia magna and Water Framework Directive Elements: Case Study of Crestuma-Lever Reservoir. Water. 2022. Vol. 14, 3989. https://doi.org/10.3390/w14233989
6. Helios-Rybicka, E., Holda, A., Jarosz, E. Monitoring and Quality Assessment of Selected Physical and Chemical Parameters of the Sola River System, South Poland. Inżynieria Środowiska. 2005. Vol. 10, P. 45–58. URL: https://www.researchgate.net/publication/314952477_Monitoring_and_Quality_Assessment_of_the_Selected_Physical_and_Chemical_Parameters_of_the_Sola_River_System_South_Poland
7. INAG. Critérios Para a Classificação Do Estado Das Massas de Água Superficiais—Rios e Albufeiras. INAG: Lisboa, Portugal, 2009. URL: https://apambiente.pt/dqa/assets/crit%C3%A9rios-classifica%C3%A7%C3%A3o-rios-e-albufeiras.pdf
8. Simões, N.R., Nunes, A.H., Dias, J.D., Lansac-Tôha, F.A., Velho, L.F.M., Bonecker, C.C. Impact of Reservoirs on Zooplankton Diversity and Implications for the Conservation of Natural Aquatic Environments. Hydrobiologia. 2015. Vol. 758, P. 3–17. https://doi.org/10.1007/s10750-015-2260-y
9. Smith, V.H., Tilman, G.D., Nekola, J.C. Eutrophication: Impacts of Excess Nutrient Inputs on Freshwater, Marine, and Terrestrial Ecosystems. Environ. Pollut. 1999. Vol. 100, P. 179–196. https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00091-3
10. Bhagowati, B., Ahamad, K. A Review on Lake Eutrophication Dynamics and Recent Developments in Lake Modeling. Ecohydrol. Hydrobiol. 2019. Vol. 19, P. 155–166. https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2018.03.002
11. Bengtsson, L., Herschy, R.W., Fairbridge, R.W. Encyclopedia of Lakes and Reservoirs. Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2012. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4410-6
12. Pinto, I., Rodrigues, S., Lage, O.M., Antunes, S.C. Assessment of Water Quality in Aguieira Reservoir: Ecotoxicological Tools in Addition to the Water Framework Directive. Ecotoxicol. Environ. Saf. 2021. Vol. 208, 111583. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111583
13. European Parliament. European Union Directive 2000/60/EC. Off. J. Eur. Communities. 2000. Vol. L327, P. 1–72. URL: http://data.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj
14. García-Chicote, J., Armengol, X., Rojo, C. Zooplankton Abundance: A Neglected Key Element in the Evaluation of Reservoir Water Quality. Limnologica. 2018. Vol. 69, P. 46–54. https://doi.org/10.1016/j.limno.2017.12.00615.
15. World Health Organization. Drinking-Water. Available online: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water
16. Alhamlan, F.S., Al-Qahtani, A.A., Al-Ahdal, M.N. Recommended Advanced Techniques for Waterborne Pathogen Detection in Developing Countries. J. Infect. Dev. Ctries. 2015. Vol. 9, P. 128–135. https://doi.org/10.3855/jidc.6101
17. Vadstein, O., Attramadal, K.J.K., Bakke, I., Olsen, Y. K-Selection as Microbial Community Management Strategy: A Method for Improved Viability of Larvae in Aquaculture. Front. Microbiol. 2018. Vol. 9. https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02730
18. Drønen, K., Roalkvam, I., Nilsen, H., Olsen, A.B., Dahle, H., Wergeland, H. Presence and Habitats of Bacterial Fish Pathogen Relatives in a Marine Salmon Post-Smolt RAS. Aquac. Rep. 2022. Vol. 26, Article 101312. https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2022.101312

19.Zhang, X.-H., He, X., Austin, B. Vibrio harveyi: A Serious Pathogen of Fish and Invertebrates in Mariculture. Mar. Life Sci. Technol. 2020. Vol. 2, P. 231–245. https://doi.org/10.1007/s42995-020-00037-z
20. Ramírez, C., Romero, J. The Microbiome of Seriola lalandi of Wild and Aquaculture Origin Reveals Differences in Composition and Potential Function. Front. Microbiol. 2017. Vol. 8. https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01844
21. Krainiukov, O., Kryvytska, I., Demenko, A., Mukhina, O. Sensitivity Assessment of *Ceriodaphnia affinis* and *Daphnia magna* for the Determination of Ecological Water Quality Standards for Chemical Substances. XVII International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment". 2023. Vol. 2023, P. 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520137
22. ДСТУ EN ISO 6222:2015. Якість води. Підрахунок культивованих мікроорганізмів. Київ: ДП «Укр-НДНЦ», 2016.URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=95726
23. Borysenko, K., Hutchinson, S.M., Sinchuk, D. 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. 2024. Vol. 60, P. 173–187. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-12

Стаття надійшла до редакції 08.04.2026 Переглянуто 10.05.2026
Стаття рекомендована до друку 19.05.2026 Опубліковано 30.05.2026

I. A. KRYVYTSKA[1], PhD (Biology),
Associate Professor of the Department of Zoology and Animal Ecology
e-mail: krivicka@karazin.ua ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-4727-794X
V. N. Karazin Kharkiv National University,
4, Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

D. A. SHABANOV[1], DSc (Biology), Prof.,
Head of the Department of Zoology and Animal Ecology
e-mail: shabanov@karazin.ua ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-3247-6882
V. N. Karazin Kharkiv National University,
4, Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

K. V. DAVYDENKO[2], PhD (Biology),
Postdoctoral Researcher, Department of Forest Mycology and Plant Pathology
e-mail: kateryna.davydenko@slu.se ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-6077-8533
Swedish University of Agricultural Sciences (SLU),
P.O. Box 7026, SE-750 07 Uppsala, Sweden

O. S. TRUSHCHENKO[3],
Chief State Inspector of the Aquatic Bioresources Protection Department
"Fish Protection Patrol"
e-mail: oleksandr.trushchenko@student.karazin.ua ORSID ID: https://orcid.org/0009-0006-3147-4331
Department of the State Agency for Land Reclamation, Fisheries and Food Programs in Kharkiv Region,
21, Kosmichna Str., Office 916, Kharkiv, 61145, Ukraine

ECOLOGICAL ASSESSMENT OF WATER QUALITY AND ICHTHYOFAUNA CONDITION OF THE PECHENIHY RESERVOIR

Purpose. To assess the quality of surface waters of the Pechenihy Reservoir based on hydrochemical and microbiological indicators, as well as to determine the possible impact of the aquatic environment condition on the ichthyofauna of the reservoir.

Methods. Field, analytical for determining indicators of microbiological and chemical pollution of surface waters..

Results. Surface water samples were collected in autumn 2025 and spring 2026 at four monitoring sites within the Pechenihy Reservoir. The collected samples were analyzed for heavy metal concentrations (Mn, Fe, Cu, Cr, Pb, Cd) and total microbial count (TMC) using certified laboratory methods in accordance with current regulatory and methodological standards. The conducted studies revealed seasonal changes in the hydrochemical and microbiological condition of the Pechenihy Reservoir. In spring 2026, compared with autumn 2025, an increase in concentrations of most investigated heavy metals and higher total microbial count values were recorded. The highest exceedances of maximum allowable concentrations were detected for manganese and total iron. Local exceedances of standards for copper and cadmium were also observed in the area of Pechenihy settlement. The spatial distribution of pollutants indicated their accumulation in the lower part of the reservoir. A significant increase in total microbial count values in spring reflected elevated organic loading and intensified microbiological processes within the aquatic ecosystem. It was established that deterioration of water quality may create unfavorable conditions for fish habitation, contribute to the development of bacterial, parasitic, and fungal diseases, and negatively affect the physiological condition of ichthyofauna.

Conclusions. The ecological condition of the Pechenihy Reservoir is characterized by a moderate level of pollution with signs of increased anthropogenic pressure during the spring period. The greatest environmental threat is associated with elevated concentrations of manganese and iron, as well as increased total microbial count values. The obtained results indicate the necessity for systematic water quality monitoring and implementation of environmental protection measures aimed at reducing pollutant inputs into the reservoir.

KEYWORDS: *water body, surface waters, water pollution, water properties, hydrochemical indicators, microbiological indicators, biological monitoring, ecological assessment*

Conflict of Interest

The authors certify that, although individual authors of the article are members of the editorial board of this journal, the peer-review process, the publication decision, and the editing process were conducted independently, without their involvement or influence. Any potential conflicts of interest were fully mitigated through external control of the process.. Furthermore, the author have fully adhered to ethical norms, including avoiding plagiarism, data falsification, and duplicate publication.

Authors Contribution: all authors have contributed equally to this work

AI Statement

Artificial intelligence technologies (ChatGPT) were used exclusively as an auxiliary tool for language editing and improving the presentation of scientific material. All scientific interpretations, analysis of results, and conclusions were performed by the authors independently.

References

1. Jackson, R.B., Carpenter, S.R., Dahm, C.N., McKnight, D.M., Naiman, R.J., Postel, S.L., Running, S.W. (2001). Water in a Changing World. *Ecol. Appl.*, 11, 1027–1045. https://doi.org/10.1890/1051-0761(2001)011[1027:WIACW]2.0.CO;2
2. Wada, Y., Graaf, I., Beek, L. (2014). High-Resolution Modeling of Human and Climate Impacts on Global Water Resources. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 6, 513–526. https://doi.org/10.1002/2014MS000322
3. Rodrigues, S., Pinto, I., Martins, F., Formigo, N., Antunes, S.C. (2021). Can Biochemical Endpoints Improve the Sensitivity of the Biomonitoring Strategy Using Bioassays with Standard Species, for Water Quality Evaluation? *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 215, 112151. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112151
4. World Water Assessment Programme. (2009). The United Nations World Water Development Report 3: Water in a Changing World. UNESCO: Paris, France; Earthscan: London, UK. ISBN 978-1-84407-840-0.
5. Diogo, B.S., Rodrigues, S., Silva, N., Pinto, I., Antunes, S.C. (2022). Evidence for Links between Feeding Behavior of Daphnia magna and Water Framework Directive Elements: Case Study of Crestuma-Lever Reservoir. *Water*, 14, 3989. https://doi.org/10.3390/w14233989
6. Helios-Rybicka, E., Holda, A., Jarosz, E. (2005). Monitoring and Quality Assessment of Selected Physical and Chemical Parameters of the Sola River System, South Poland. *Inżynieria Środowiska,* 10, 45–58. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/314952477_Monitoring_and_Quality_Assessment_of_the_Selected_Physical_and_Chemical_Parameters_of_the_Sola_River_System_South_Poland
7. INAG. (2009). Critérios Para a Classificação Do Estado Das Massas de Água Superfíciais—Rios e Albufeiras. INAG: Lisboa, Portugal. Retrieved from https://apambiente.pt/dqa/assets/crit%C3%A9rios-classifica%C3%A7%C3%A3o-rios-e-albufeiras.pdf

8. Simões, N.R., Nunes, A.H., Dias, J.D., Lansac-Tôha, F.A., Velho, L.F.M., Bonecker, C.C. (2015). Impact of Reservoirs on Zooplankton Diversity and Implications for the Conservation of Natural Aquatic Environments. *Hydrobiologia*, 758, 3–17. https://doi.org/10.1007/s10750-015-2260-y
9. Smith, V.H., Tilman, G.D., Nekola, J.C. (1999). Eutrophication: Impacts of Excess Nutrient Inputs on Freshwater, Marine, and Terrestrial Ecosystems. *Environ. Pollut.*, 100, 179–196. https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00091-3
10. Bhagowati, B., Ahamad, K. (2019). A Review on Lake Eutrophication Dynamics and Recent Developments in Lake Modeling. *Ecohydrol. Hydrobiol.*, 19, 155–166. https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2018.03.002
11. Bengtsson, L., Herschy, R.W., Fairbridge, R.W. (2012). Encyclopedia of Lakes and Reservoirs. Springer: Dordrecht, The Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4410-6
12. Pinto, I., Rodrigues, S., Lage, O.M., Antunes, S.C. (2021). Assessment of Water Quality in Aguieira Reservoir: Ecotoxicological Tools in Addition to the Water Framework Directive. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 208, 111583. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111583
13. European Parliament. (2000). European Union Directive 2000/60/EC. Off. J. Eur. Communities., L327, 1–72. Retrieved from http://data.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj
14. García-Chicote, J., Armengol, X., Rojo, C. (2018). Zooplankton Abundance: A Neglected Key Element in the Evaluation of Reservoir Water Quality. *Limnologica*, 69, 46–54. https://doi.org/10.1016/j.limno.2017.12.006
15. World Health Organization. (2024). Drinking-Water. Retrieved from: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water
16. Alhamlan, F.S., Al-Qahtani, A.A., Al-Ahdal, M.N. (2015). Recommended Advanced Techniques for Water-borne Pathogen Detection in Developing Countries. *J. Infect. Dev. Ctries.*, 9, 128–135. https://doi.org/10.3855/jidc.6101
17. Vadstein, O., Attramadal, K.J.K., Bakke, I., Olsen, Y. (2018). K-Selection as Microbial Community Management Strategy: A Method for Improved Viability of Larvae in Aquaculture. *Front. Microbiol.*, 9. https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02730
18. Drønen, K., Roalkvam, I., Nilsen, H., Olsen, A.B., Dahle, H., Wergeland, H. (2022). Presence and Habitats of Bacterial Fish Pathogen Relatives in a Marine Salmon Post-Smolt RAS. *Aquac. Rep.*, 26, 101312. https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2022.101312
19. Zhang, X.-H., He, X., Austin, B. (2020). Vibrio harveyi: A Serious Pathogen of Fish and Invertebrates in Mariculture. Mar. *Life Sci. Technol.*, 2, 231–245. https://doi.org/10.1007/s42995-020-00037-z
20. Ramírez, C., Romero, J. (2017). The Microbiome of Seriola lalandi of Wild and Aquaculture Origin Reveals Differences in Composition and Potential Function. *Front. Microbiol.*, 8. https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01844
21. Krainiukov, O., Kryvytska, I., Demenko, A., Mukhina, O. (2023). Sensitivity Assessment of Ceriodaphnia affinis and Daphnia magna for the Determination of Ecological Water Quality Standards for Chemical Substances. XVII International Scientific Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”, 2023, 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520137
22. Water quality. Enumeration of cultured microorganisms. (2016). DSTU EN ISO 6222:2015. Kyiv: State Enterprise "UkrNDNTs". Retrieved from https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=95726
23. 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

The article was received by the editors 08.04.2026 The article was revised 10.05.2026
The article is recommended for printing 19.05.2026 This article published 30.05.2026

https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-08
УДК: 911.3:502.5]:622.34(477)

T. S. KOPTIEVA, PhD (Earth Sciences), Assoc. Prof.,
Associate Professor of the Department of Socio-Economic Disciplines and Geography,
e-mail: koptevatania36@hnpu.edu.ua ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-9405-16744
H. S. Skovoroda Kharkiv National Pedagogical University
29, Alchevskykh, Str., Kharkiv, 61000, Ukraine

GEOECOLOGICAL FEATURES OF THE FORMATION AND DEVELOPMENT OF MINING LANDSCAPE-TECHNICAL SYSTEMS OF UKRAINE

Purpose. To analyze the patterns of formation, structure, and functioning of mining landscape-technical systems of Ukraine, to identify their typological features, and to substantiate directions for their optimization and rational use under current geoecological challenges.

Methods. Historical-geographical approach, landscape-geomorphological analysis, cartographic modeling using GIS technologies (Google Earth), generalization method, and anthropogenic-landscape forecasting method.

Results: The mining territories of Ukraine represent complex landscape-technical systems formed as a result of long-term interaction between natural conditions and technogenic processes. These systems extend beyond the boundaries of mining and land allotments, encompassing extensive adjacent areas transformed by mining activities, including post-mining landscapes. It has been found that the dominant elements of these territories are geo-mining technical systems, whose structure includes natural, technological, and information blocks, while their functioning is associated with the movement of mineral matter and intensive geodynamic processes. It has been established that mining landscapes are formed under the influence of both open-pit and underground mining methods, which determines their morphological diversity (quarry-dump, subsidence-related, lake-wasteland, etc.). It has been proven that the Kryvyi Rih Landscape-Technical System (KLTS) serves as a unique testing ground for the formation of technogenic landscapes, where a wide range of their types is concentrated. It has been determined that anthropogenic landscapes occupy significant areas, forming a complex altitudinal-landscape structure with accumulative, denudation-accumulative, and denudation levels. It has been revealed that the intensive development of mining activities has led to substantial transformations of relief, the hydrological network, microclimate, soil cover, and vegetation of the region. The features of the Donetsk and Pre-Carpathian landscape-technical systems have been analyzed; they are characterized by a high level of anthropogenic pressure, significant disturbances of geosystems, activation of exogenous processes, and the formation of technogenic landforms. It has been established that within the Donbas region there is intensive soil and water pollution, disruption of the hydrogeological regime, and the emergence of hazardous geodynamic phenomena. The Pre-Carpathian region is characterized by slow processes of natural restoration of vegetation and soils, accompanied by significant mosaicity of the landscape structure. It has been identified that the formation of mining landscapes is accompanied by the development of negative natural-anthropogenic processes (erosion, karst, subsidence, flooding, pollution), which determine the current geoecological state of the territories. It has been substantiated that the optimization of mining territories should be based on a systemic approach, taking into account structural, functional, and dynamic characteristics of geosystems, and should include land reclamation, the development of geoecological monitoring, and rational environmental management.

Conclusions: The mining landscape-technical systems of Ukraine are complex natural-anthropogenic formations, whose functioning is determined by the interaction of natural factors and technogenic processes. They are characterized by significant transformation of natural components, the formation of specific morphological structures, and active migration of matter. The current state of these systems is associated with the development of geoecological problems, which necessitates the implementation of comprehensive optimization measures, including reclamation, monitoring, and rational resource use. The identified patterns of formation and development of mining landscapes should serve as a basis for further research and practical measures aimed at stabilizing and restoring disturbed territories.

KEYWORDS: *mining landscapes, landscape-technical system, geo-mining technical system, technogenic landscape, anthropogenic transformation, reclamation, geoecological optimization*

© Koptieva, T. S., 2026
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0

Як цитувати: Koptieva T. S. Geoecological features of the formation and development of mining landscape-technical systems of Ukraine. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2026. Вип. 34. С.110-124. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-08

In cites: Koptieva, T. S. (2026). Geoecological features of the formation and development of mining landscape-technical systems of Ukraine. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology,* (34), 110-124. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-08

Introduction

Mining-industrial territories correspond to mining and land allotments; however, the concept of a "mining-industrial territory" is considerably broader and includes anthropogenically transformed areas that have emerged beyond these allotments and remain under the influence of the mining industry. Post-industrial territories that emerged after the completion of mineral extraction and beneficiation possess a specific status. Within these territories, remnants of historical objects (mines, excavations, buildings, etc.) have been preserved, while transformed landforms have developed at the industrial sites and waste storage facilities, accompanied by activated processes of landscape self-restoration. The primary objective of this constructive-geographical study is to analyze the landscape structure of mining-industrial territories, identify their comprehensive characteristics, and substantiate proposals for their further rational use. This involves the application of various methodological approaches: geoecological, geocadastral, historical-geographical, and medical-geographical.

Although the formation of mining-industrial landscapes is conditioned by human activity, they develop within specific physical-geographical conditions and in close interaction with existing natural landscapes. Consequently, an important feature of their study is the consideration of both natural and socio-historical factors. At present, mining-industrial territories constitute complex landscape-technical structures formed under the influence of various anthropogenic impacts, including mining-industrial, residential, transport, hydraulic-engineering, and others. The dominant subtype within mining-industrial territories is represented by geo-mining technical systems. Geo-mining technical systems belong to autonomous geotechnical systems in which a forced movement of the system-forming flow of mineral matter occurs [19]. In the conceptual scheme of geo-mining technical systems, the following principal elements may be distinguished: the extraction component (mineral extraction equipment), the servicing component (drainage systems and waste-rock development systems), and the accompanying component (quarry-dump complexes). The functioning of geo-mining technical systems is primarily determined by the specifics of their formation and development. A characteristic feature of mining-industrial geo-mining technical systems is their particular structure, whose main elements include the natural (landscape), technological (design, extraction, and processing), and informational blocks. A distinctive feature of the technological extraction element of geo-mining technical systems is the presence of several units, namely: quarry and dumping units (for open-pit mining operations) and mine units (for underground mining operations). The structural elements of geo-mining technical systems are distinguished by the peculiarities of both the technological process and their functioning.

In Ukraine, both anthropogenic and mining-industrial landscapes, particularly those of southern Ukraine, were first studied by Yu. I. Hlushchenko, who investigated the anthropogenic-natural geocomplexes of the Kerch Peninsula and characterized mining-industrial developments. The views of V. I. Vernadsky, A. E. Fersman, and V. H. Bondarchuk concerning the scale and significance of industrial activity in the life of planet Earth are widely recognized. Taking into account their development features, landscape structure, and impact on the natural environment, industrial landscapes are subdivided into industrial proper and mining-industrial landscapes.

Mining-industrial landscapes of Ukraine have been investigated by such researchers as H. I. Denysyk, V. L. Kazakov, H. M. Zadorozhnia, S. M. Smetana, and others. S. M. Smetana developed a taxonomic classification of technogenic landscapes. V. L. Kazakov focused on theoretical issues of anthropogenic landscape

science, carried out a classification of technogenic, particularly mining-industrial, landscapes, and proposed mechanisms for their rational use. H. I. Denysyk and H. M. Zadorozhnia developed a taxonomic system of mining-industrial landscapes and identified derivative processes and phenomena within them.

Among the studies devoted to industrial landscapes, the works of L. M. Tiutiunnyk deserve special attention. Based on field research, these works provided the first characterization of the industrial landscapes of the Kryvyi Rih Landscape-Technical System, proposed classification schemes, partially investigated their geochemical properties, and compiled corresponding cartographic schemes.

Numerous scholars have also investigated anthropogenic types of localities directly associated with mining-industrial landscapes, including V. H. Bondarchuk, Ye. A. Ivanov, H. I. Denysyk, A. V. Hudzevych, and I. M. Voina. Their scientific works present a wide variety of anthropogenic landforms (negative and positive) formed during the extraction of mineral resources.

Object and Methods of Research

The object of the study is the mining-industrial landscape-technical systems of Ukraine in terms of their geoecological condition and development. In selecting the terminological framework of mining-industrial landscapes, the method of terminological analysis was applied. The principle of historicism was employed to analyze the development and formation of mining-industrial landscape-technical systems within the territory of Ukraine.

In the analysis of mining-industrial landscape-technical systems, the methods of observation and diagnostics were used. The observation method made it possible to obtain primary information in the form of a body of empirical knowledge. The diagnostic method was applied to identify the principal properties and characteristics of the investigated mining-industrial landscape-technical systems. The method of landscape-geomorphological analysis enabled the study of contemporary landforms and revealed the dependence of the spatial distribution of mining-industrial landscape-technical systems on terrain features. Based on the conducted research, the territories were mapped using Google Earth. In certain cases, fragments of specific types of mining-industrial landscapes (quarry-dump types) were also demonstrated, including the quarries of PJSC “Inhulets Mining and Processing Plant” and PJSC “Southern Mining and Processing Plant.” By applying the method of generalization, conclusions of a theoretical, methodological, and practical nature were substantiated. The method of anthropogenic-landscape forecasting made it possible to develop approaches for improving the structure of mining-industrial landscape-technical systems, preventing their destruction, enhancing their qualitative characteristics, and predicting future changes within particular regions.

Results and Discussion

Industrial landscapes in Ukraine have formed around large industrial enterprises of the processing industry or within industrial regions. In particular, they are concentrated in Donbas, Kryvbas, the Industrial Prydniprovia region, the Lviv–Volyn Basin, and others. Areas dominated by industrial landscapes are characterized by the most active formation and rapid accumulation of technomass, the presence of a two-tier (surface and subsurface) structure of unique landscape complexes, the complete anthropogenization of geocomponents and landscape complexes, as well as clearly defined temporal and spatial boundaries of industrial landscapes, which in most cases makes it possible to distinguish industrial landscapes from other anthropogenic ones [13].

The mining industry in the Kryvyi Rih region has been functioning for approximately one and a half centuries; however, even within this relatively short period, it has transformed natural landscapes into anthropogenic ones, which currently dominate the landscape structure of the region.

The Kryvyi Rih Landscape-Technical System (hereinafter referred to as the KRLTS) originated within the territory of Kryvyi Rih in Dnipropetrovsk Oblast. Its development is based on the Kryvyi Rih iron ore basin. The extraction of mineral resources, primarily iron ores, in this territory was accompanied by significant transformation of natural landscapes and the formation of anthropogenic landscapes. Their area increases annually, mainly due to the

expansion of mining-industrial landscapes. At present, iron ore extraction is concentrated at the following mining and processing plants: Central, Northern, Southern, and Inhulets Mining and Processing Plants, which belong to LLC "Metinvest Holding," as well as the Novokryvorizkyi Mining and Processing Plant, which belongs to PJSC "ArcelorMittal Kryvyi Rih." In terms of the concentration of mines, quarries, and mining and processing plants, this macroregion has no equivalent in global practice. It was precisely on the basis of the mining-industrial enterprises of the Kryvbas basin that the KRLTS was formed [8].

The spatial configuration of the KRLTS has undergone significant changes, and its established boundaries are not absolute but rather conditional. A clear tendency toward boundary transformation can be observed due to the active development of technogenesis. In the mid-1970s, the boundaries of the KRLTS almost completely coincided with those of the Inhulets-Saksahan valley-gully physical-geographical district of the steppe spurs of the Dnipro Upland within the Dniester–Dnipro northern-steppe province. However, by the late 1980s, mining-industrial construction had begun in the eastern part of the Middle Inhulets inclined physical-geographical district. Consequently, from the 1990s to 2010, the boundaries of the Kryvbas quarries were altered, and new territories were allocated for waste dumping. Administratively, the KRLTS encompasses the territories of two districts – Kryvyi Rih and Shyroke – as well as parts of the adjacent Apostolove, Pyatykhatky, and Sofiivka districts of Dnipropetrovsk Oblast, in addition to small territories within the Vysokopillia district of Kherson Oblast and the Kazanka district of Mykolaiv Oblast. At present, according to its territorial configuration, the KRLTS extends 96 km from north to south and 62 km from west to east, covering an area of 4.1 thousand km², which constitutes 0.67% of the territory of Ukraine (Fig. 1).



Fig. 1 – Current boundaries of the Kryvyi Rih landscape-technical system (prepared using GIS technology Google Earth)

Mining-industrial landscapes are widespread throughout the territory of the Kryvyi Rih region, which is stipulated by the specific spatial occurrence of iron ore deposits within the Kryvyi Rih iron ore basin. Over time, anthropogenic landscapes – predominantly mining-industrial ones – have emerged and continue to develop, currently occupying nearly 40 thousand hectares and playing a significant role in the functioning of the contemporary Kryvyi Rih Landscape-Technical System (KRLTS). At the same time, the heterogeneity of natural conditions, together with the presence of quarries and waste dumps, determines the specific features of the region's altitudinal and landscape structure.

The surface landforms of the KRLTS were formed on the basis of the Ukrainian Shield and its geological formations. The leading element of the morphostructural relief consists of forest-loamy upland and lowland watershed plateaus complicated by various types of morphosculpture, including fluvial, karst, suffosion, gravitational, and aeolian forms. The relief is represented predominantly by meso- and microforms. Due to the activity of temporary watercourses, erosion, material transportation, and accumulation, a fluvial relief developed. During the formation of the mining-industrial complex, fluvial processes immediately begin to exert an active influence on the lithogenic base, transforming and stabilizing it.

Within the KRLTS, anthropogenic saline and freshwater reservoirs accumulate approximately 500 million m³ of water. Among them, sludge storage facilities contain up to 200 million m³ of mine and quarry waters with an average mineralization of 5–8 g/dm³. Every year, more than 40 million m³ of mine water from depths of up to 1,500 m reaches the surface from the aquifers of all geological structures within this territory. At the same time, the estimated flooded areas caused by water filtration from sludge storage facilities within Kryvbas amount to 230–270 km². The hydrological network of the KRLTS has been completely transformed. The microclimate has undergone significant changes not only within Kryvbas itself but also in adjacent regions. In landscapes affected by technogenic activity within the KRLTS, natural soils have been replaced by soil mixtures and technogenic substrates, while the vegetation cover has been transformed into phytocenoses dominated by synanthropic and ruderal (weed) associations with impoverished taxonomic composition.

As a result of iron ore extraction and industrial waste disposal along the iron ore deposits of the Kryvyi Rih geological structure, the northern steppe landscapes and the riverbeds of the Saksahan and Inhulets rivers were completely destroyed. In their place, anthropogenic landscapes – predominantly residential and industrial – have emerged and continue to develop actively, becoming the dominant background landscapes within the KRLTS. Contemporary natural landscapes of the KRLTS have formed under the influence of landscape-forming factors, including lithogenic, hydrogeological, soil, and vegetation factors [18].

The structure of the mining-industrial landscapes of the KRLTS is formed by the following locality types: quarry-dump types (dump-monobasin, plateau-shaped multi-tier dump, ridge-shaped multi-tier dump, quarry-dump-lake, quarry-dump-terrace, quarry-lake-terrace, and quarry-terrace types), as well as mine-collapse, mine-subsidence, and lake-wasteland locality types.

Mining-industrial landscapes of the Kryvyi Rih region have mainly been studied within the framework of altitudinal stages, altitudinal-landscape levels, and locality types. As a result, three altitudinal-landscape levels have been distinguished: accumulative, denudation-accumulative, and denudational. These are characteristic of almost all quarry-dump complexes within the KRLTS. The most widespread locality types in this territory are quarry-terrace and plateau-shaped multi-tier dump types. The altitudinal differentiation of each of these types is also heterogeneous. In particular, microzones – areas characterized by different rates of denudation-accumulative processes – are clearly distinguished within them. It is important to note the upper denudational, middle accumulative-denudational, and lower accumulative microzones. Altitudinal tiers can also be observed within these microzones [5].

Having passed through various stages and phases of development, relatively stable biocenoses dominated by steppe zonal flora have formed within the quarry-dump locality types of the KRLTS. These include *Festuca rupicola Heuff*, *Koeleria cristata* (L.), *Poa stifola* (L.), *Elytrigia repens* (L.), *Agropiron pectinatum* (Bieb.), *Lotus ukrainicus* (Klok.), *Astragalus dasyanthus* (Pall.), *Coronilla varia* (L.), *Melilotus albus* (Medik.), *Xeranthemum annuum* (L.), *Galium verum* (L.), and others, totaling more than 100 species. In addition, territories adjacent to waste dumps (ravines and fallow lands) characterized by chernozem substrates contain such species as *Stipa lessingiana* (Trin.), *Gagea ucranianica* (Klok.), *Thymus marschallianus* (*Willd.*), *Adonis vernalis* (L.),

Salvia officinalis (L.), and others. On old waste dumps with rocky substrates (Precambrian crystalline rocks, including granites, amphibolites, gneisses, quartzites, shales, etc.) and mixed substrates (combinations of Precambrian crystalline rocks and Cenozoic sedimentary rocks), the following species are widespread: *Zygophyllum fabago* (L.), *Crambe tataria* Sebeok, *Crambe pontica* (*Stev. ex Rupr*.), *Alyssum minutum* (*Schlecht. ex DC*.), *Gypsophila paniculata* (L.), *Dryopteris filix-mas* (L.) Schott, and others. In general, all local landscape-technical systems of Kryvbas are characterized by an incomplete cycle of vegetation cover and landscape formation. The overwhelming majority of plants on waste dumps are anemochorous (up to 60%) and barochorous (up to 20%), while only certain old spoil heaps exhibit a significant degree of vegetation closure and function as centers of ecological information for adjacent systems [7].

Kryvbas is the most unique region of Ukraine in terms of both the diversity and territorial structure of mining-industrial landscapes. Within the relatively small territory of the Kryvyi Rih region (4.1 thousand km²), highly diverse groups of technogenic landscapes have formed. The region represents a landscape unique area where almost all varieties of technogenic landscapes of Ukraine are combined. It has been estimated that within the city of Kryvyi Rih, which constitutes the residential-industrial core of the region, the most widespread technogenic landscapes are residential (34.1%), industrial (31.9%), and transport (15.0%) types. Currently, seven quarries operate within the territory of Kryvbas: Quarry No. 1 of the Northern Mining and Processing Plant, Quarry No. 2 of the Northern Mining and Processing Plant, Quarry No. 3 of the Northern Mining and Processing Plant, the Southern Mining and Processing Plant Quarry, the Hleiuvatka Quarry belonging to the Central Mining and Processing Plant, the Pershotravnevyi Quarry belonging to the Northern Mining and Processing Plant, the Hannivka Quarry belonging to the Northern Mining and Processing Plant, and the Inhulets Quarry belonging to the Inhulets Mining and Processing Plant.

The KRLTS holds several records within the mining industry:

- The deepest iron ore quarry in Europe – the quarry of PJSC "Inhulets Mining and Processing Plant" is one of the most powerful and deepest quarries in Europe, reaching a depth of 426 m. The quarry contains substantial iron ore reserves amounting to approximately 38 million tons of ore (Fig. 2).



Fig. 2 – The quarry of PJSC "Inhulets Mining and Processing Plant"
(prepared using GIS technology Google Earth)

- The quarry of PJSC "Southern Mining and Processing Plant" is one of the largest quarries in the world and serves as one of the principal sites for iron ore extraction in Ukraine, as well as a major attraction of industrial tourism. Its depth is approximately 400 m, its length reaches 3 km, and its width is 2.6 km. The quarry has a rounded shape and, in terms of productivity and depth, is surpassed only by the Inhulets Mining and Processing Plant quarry (Fig. 3).

- The deepest iron ore mine in the world, located within the KRLTS, is the Kryvorizka Mine (formerly known as the Rodina Mine). The designed production capacity of the mine amounts to 2.6 million tons of high-grade ore and is ensured through the development of the 1240–1315 m horizons. The iron content in the ore massif at the operating horizons of 1165 m and 1240 m reaches 58.6%. The shaft of the Kryvorizka Mine extends to a depth of 1,580 m.



Fig. 3 – The quarry of PJSC "Pivdennyi Mining and Processing Plant" (prepared using GIS technology Google Earth).

The Donetsk Landscape-Technical System, where all major grades of coal are represented, constitutes the principal coal-bearing region of Ukraine in terms of both reserves and extraction volumes. Within the Carboniferous strata, approximately 300 coal seams have been identified, two-thirds of which have a thickness of 0.30–0.45 m, while only 130 seams exceed 0.45 m in thickness. Geologically, Donbas is divided into two coal-bearing regions: the Southwestern and the Northeastern. The former is associated with the Kalmius–Torets depression, whereas the latter corresponds to the Bakhmut Basin.

Within the Donetsk Carboniferous sequence, two maxima of coal accumulation are distinguished: in the Lower Carboniferous, the Upper Visean and Lower Serpukhovian deposits, and in the Middle Carboniferous, two stratigraphic stages. The principal reserves of Donetsk coal are of Middle Carboniferous age. Lower Carboniferous coal-bearing deposits of industrial significance extend along the southern margin of the Donetsk depression for approximately 300 km and have a width ranging from 15 to 40 km. Middle Carboniferous coal-bearing deposits are distributed throughout the entire territory of the depression and are most clearly expressed within the depression itself and on its southwestern slope. Along the depression, the coal-bearing capacity gradually decreases and completely disappears toward the northeastern direction.

According to the scheme of economic regionalization, two principal economic subregions were formed within the territory of Donetsk Oblast: the Central Industrial Subregion and the Southern (Azov) Industrial-Agricultural Subregion. In turn, the Donetsk–Sloviansk polycomponent zone is located within Donetsk, Luhansk, and partially Dnipropetrovsk oblasts and is associated with the Hercynides of the Donetsk folded structure and the deposits of the Dnipro–Donetsk Depression. This zone is conventionally divided into two macroregions: the Donetsk and the Sloviansk–Artemivsk macroregions. In general, a significant number of deposits of complex-forming mineral resources are densely concentrated within the zone, while some of them (hard coal and rock salt) are characterized by basin-type distribution. The combination of various types of fuel-energy, mining-chemical, technological, non-metallic raw materials for metallurgy, and construction materials caused the formation of a complex of extraction, beneficiation, and processing enterprises of fuel-energy, metallurgical, chemical, and construction specialization within this territory. As a result, three industrial agglomerations and eleven industrial hubs were formed within Donbas [8].

The territories of Donetsk and Luhansk oblasts of Ukraine are located within the steppe climatic zone, and these lands contain the largest proportion of steppe natural and semi-natural landscapes in Ukraine. Within Donetsk and Luhansk oblasts, the area of steppe landscapes amounts to 314,499 and 596,210 hectares respectively, constituting 8% and 19% of the total area of the oblasts. Natural territories of the region are represented by steppe ecosystems: the central part of Donetsk Oblast and the southern part of Luhansk Oblast are occupied by the rocky steppes of the Donetsk Ridge, the northern part of Luhansk Oblast is represented by chalk flora communities also belonging to the steppe type, while the southern part of Donetsk Oblast consists of the flat chernozem steppes of the Azov region.

Intensive exploitation of mineral deposits, their further beneficiation, and processing negatively affect the lithosphere and contribute to the activation of exogenous geological processes, changes in the physicomechanical properties and composition of soils, and pollution of groundwater and surface waters of Donbas. Within a relatively short period, natural waters, soils, vegetation, and other components of the natural environment are destroyed under the influence of mining technogenesis. The mechanism of these processes is primarily determined by the migration of toxic metal compounds together with natural waters. In particular, lead is widespread in the soils of Donetsk Oblast due to the presence of its sources, including motor vehicles, metallurgical and coke-chemical industries, coal-fired boiler plants, and others. The average lead content in urban soils (96.8 mg/kg) is almost three times higher than in rural areas (35.4 mg/kg). The average zinc content in urban soils (228.1 mg/kg) exceeds by more than three times its concentration in rural soils (60.8 mg/kg). The manganese content in urban soils of the region (2296 mg/kg) is approximately twice as high as in rural areas (1274 mg/kg), where manganese concentrations do not exceed current hygienic standards [7].

The development of the extractive industry has been accompanied by the alienation of large areas of agricultural land in Donbas, which, after temporary use, were transformed into technogenic wastelands. Significant losses of land resources also occurred because safety zones were established around each waste rock dump, within which atmospheric air became polluted and soils salinized and waterlogged. Large areas are occupied by sites of concentrated solid waste from processing enterprises, including ash dumps, tailings storage facilities, and slag disposal sites. Their substrates contain substantial amounts of toxic elements contaminating the atmosphere, soils, groundwater, and surface waters. The most prolonged and intensive impact on natural landscapes and the formation of mining-industrial landscapes occurs during open-pit extraction of mineral resources. In such cases, mixed rock horizons are exposed and transferred to waste dumps. In addition, the morphological components of natural landscapes, from tracts to locality systems, undergo restructuring. Significant territories of Donetsk Oblast have experienced such destruction of natural landscape structure, where numerous deposits of different types of mineral raw materials are exploited by open-pit methods.

By the beginning of the armed conflict in Donbas, up to 14 billion tons of coal and waste rock had been extracted, while the volume of created mine workings exceeded 9 billion m^3, and the total area of fragmented disturbed territory reached 15 thousand km^2. The mine complex of Donbas represents a stable source of emissions amounting to up to 6 billion m^3/year of explosive and toxic gases (methane, radon, etc.), whose migration pathways are significantly altered under military impacts on mine drainage and ventilation regimes. In general, industrial coal extraction caused irreversible disturbances of the

geodynamic and hydrodynamic equilibrium of the region and significantly increased the sensitivity of the geological system to military factors.

Technogenic disturbances of natural conditions within this territory are primarily caused by mining operations conducted at nearly 900 mines across 180 coal seams. In total, approximately 2,250 seam workings are counted within the coal-bearing geological structures, which significantly reduced their geomechanical stability during flooding and background seismic events. The created natural-technogenic geosystem of the region – "technogenic objects – environment" – encompassed approximately 4,000 potentially hazardous facilities, more than 300 mines and quarries, and 2.5 thousand so-called "kopanky" (unlicensed shallow pits), as well as up to 1,300 spoil heaps, among which more than 300 are burning and constitute permanent sources of pollution by toxic elements and compounds affecting the near-surface atmosphere, adjacent landscapes, and groundwater. At the same time, under conditions of reduced mine drainage (almost by half) and increasing flooded areas, the risk of accelerated burning of spoil heaps and their explosion with destructive effects on adjacent residential and industrial facilities significantly increases. Critical ecological impacts on the hydrogeomechanical conditions of the geological system (filtration compression, mechanical and chemical suffosion, etc.) and disturbances of surface and underground hydrosphere regimes were caused by the annual inflow into mine workings of up to 760 million m^3 (24.5 m^3/s) of contaminated mineralized mine waters containing up to 2.5 million tons/year of water-soluble salts. During the expansion of coal mining operations and disturbances of the geological system, including regional aquitards and the spatial development of technogenic fracturing accompanied by riverbed disruption (more than 600 cases), the volume of local groundwater runoff resources increased up to fivefold.

Considering the severe impact of hazardous exogenous processes (landslides, karst, abrasion, flooding, etc.) on Donetsk Oblast, the entire territory has been classified as a first-category hazard area. The length of the coastline affected by abrasion amounts to approximately 50.7 km. The total area of rocks susceptible to leaching constitutes 3,102 km^2. The area of open karst distribution reaches 52 km^2, with 371 manifestations accounting for 11.7% of the affected territory. The dissolution of carbonate and sulfate rocks occurs at different rates. Karst processes are most widespread and develop most rapidly in gypsum-bearing and salt-bearing deposits. These areas are located on the slopes of the Bakhmut, Mokra and Sukha Plotva, Kazennyi Torets rivers, and the Horilyi Pin stream. Human activity (mines, brine extraction industries, quarries, large water intakes, and leakage from urban communications) significantly accelerates karst processes by increasing the velocity of groundwater movement within fissure-karst aquifers. Surface areas where karst-forming processes are most widespread are located in Sloviansk, Kramatorsk, Soledar, Bakhmut, and Mariupol [9].

The vegetation of the Donetsk Landscape-Technical System is represented by such species as *Astragalus sareptanus* A. Beck, *Bulbocodium versicolor*, *Centaurea pseudoleucolepis* Kleopow, *Hyssopus cretaceus* Dubjan, *Neottia nidus-avis*, *Adonis vernalis* L. Spach, *Onosma tanaitica* Klokov, *Achillea glaberrima* Klokov, *Matthiola fragrans* Bunge, *Elytrigia stipifolia* (Czern. ex Nevski) Nevski, *Lycopodiella inundata* (L.) Holub, and others.

The Donetsk Landscape-Technical System also contains numerous mining facilities known not only in Ukraine but throughout Europe:

- PJSC "Pokrovske Mine Administration" is the largest coal mine in Ukraine, with a projected production capacity of 2.1 million tons per year. Industrial coal reserves exceed 200 million tons.

The Pre-Carpathian Landscape-Technical System is located within the territories of Lviv and Ivano-Frankivsk oblasts. Spatially, it is associated with the Pre-Carpathian Foredeep. According to geological regionalization, this zone incorporates several major territorial concentrations of mineral deposits: the Pre-Carpathian oil and gas region, the Pre-Carpathian sulfur-bearing basin, the Pre-Carpathian potassium-bearing basin, the Dniester gypsum-bearing district, and others. It is characterized by a clustered pattern of territorial distribution of mineral deposits. In particular, the Boryslav–Stebnyk and Dolyna–Kalush macroclusters, as well as the Yavoriv, Rozdil, Mykolaiv–Pustomyty, Nadvirna, Bilche–Volytsia, and Staryi Sambir clusters, are distinguished.

The Pre-Carpathian Landscape-Technical System is characterized by three historical-geographical periods of mineral resource exploitation: the pre-industrial period, the artisanal period (before 1772), and two industrial periods – the manufactory period (until 1939) and the industrial period (until 1991). In the course of research on the Pre-Carpathian Landscape-Technical System, particular attention has been devoted to the natural conditions of soil substrate formation and

vegetation self-restoration on ozokerite mining waste dumps. It was established that these formation processes proceed slowly within the waste dumps. The principal limiting factor for phytocenosis formation on extraction dumps is excessive salinization of the soil substrate. The first species to restore vegetation on the dumps is sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides*), which occurs in the form of dense thickets and isolated small clusters. In addition to sea buckthorn, black poplar (*Populus nigra*), silver birch (*Betula pendula*), aspen (*Populus tremula*), Norway maple (*Acer platanoides*), and European ash (*Fraxinus excelsior*) occur within this territory. Flooded and poorly drained depressions provide natural conditions for the development of hydrophilic and hygrophilous vegetation, whereas mesophilous and xerophilous vegetation dominates on the tops of waste dumps. The mosaic character of the natural conditions of the dumps has resulted in differences in vegetation species composition. The greatest species diversity is characteristic of phytocenoses in flooded areas. Poor vegetation composition is typical of steep slopes affected by sheet erosion and saline areas of newly formed spoil deposits [13, p. 140].

Regarding the natural-economic systems of the Pre-Carpathian sulfur-bearing basin, the development of geosystems and the degree of their anthropogenic transformation under conditions of liquidation of sulfur industry enterprises possess specific features. In particular, this includes the ecological condition of mining-industrial geosystems under the flooding of sulfur quarries and the creation of reservoirs and recreational zones on their basis. The territory of the Pre-Carpathian Landscape-Technical System is characterized by centers of hazardous exogenous processes, including landslides, erosion, karst, abrasion, and others.

Reclamation is particularly necessary within burning coal waste dumps (especially the dump of PJSC “Lviv Coal Company”), zones of intensive land subsidence, karst sinkholes, flooded areas, and ozokerite mining dumps. Special attention should also be devoted to the regularities of geosystem functioning and development within areas of underground sulfur smelting (mining districts “Pisotskyi” and “Borysy”). The degree of anthropogenic transformation of soil and vegetation cover is relatively high. Within the mining district “Yavoriv Reservoir,” geosystems with a moderate level of transformation of embryozems predominate. Soil formation on external dumps, tailings storage facilities, the internal part of hydraulic dumps, and the southern sections of the quarry occurs almost without human intervention. Areas of strong anthropogenic influence on soil mixtures have been identified in zones of ongoing industrial use, construction sand extraction, and accumulation of solid household waste. Strongly transformed vegetation communities dominate, accounting for 38.7% of the total area of the site. Significant transformational changes associated with sulfur extraction and post-mining activities have occurred in the majority of geosystems within the Pre-Carpathian mining-industrial landscape-technical system. Severe vegetation damage is observed within the shoreline zones of reservoirs and areas undergoing reclamation works. Vegetation cover remains almost unrestored within industrial sites and areas of illegal construction sand extraction. Within sulfur deposits, only 5–6% of disturbed territories have been reclaimed. These are mainly dumps formed from Quaternary loess-like loams. On most dumps composed of Neogene clays, reclamation activities are not conducted. Soil formation, as well as the further functioning conditions of young embryozems and technosols, exhibit a number of features differing from natural analogues. Depending on the age of the dumps and the nature of overburden rocks, pedogenesis affects the upper substrate layers (3–20 cm). Soil mixtures are characterized by low thickness and weak differentiation of the vertical profile. They are marked by the formation of simple vegetation communities as a result of spontaneous overgrowth and reclamation, accumulation of primary organic matter, development of organogenic horizons, and related processes [13].

Post-mining geosystems within the Pre-Carpathian sulfur-bearing basin are gradually overgrown by woody vegetation (*Pinus sylvestris*, *Hippophae rhamnoides*, *Salix caprea*, *Robinia pseudoacacia*, *Populus tremula*, *Betula pendula*) and herbaceous species, indicating the potential for independent natural restoration of soil and vegetation cover. However, the processes of self-restoration of disturbed lands proceed too slowly.

The vegetation of the Pre-Carpathian Landscape-Technical System is mainly represented by such species as *Blechnum spicant*, *Pyrola rotundifolia*, *Moneses uniflora*, and others. The European type of geographical elements includes *Streptopus amplexifolius*, *Symphytum cordatum*, *Primula elatior*, *Mercurialis perennis*, and others. Among the representatives of the European geoelement, numerous endemic species are also present, including *Festuca carpatica*, *Festuca porcii*, *Cardamine opizii*, *Sedum carpaticum*, *Viola*

declinata, *Leucanthemum rotundifolium*, *Muscari pocuticum*, and others.

In general, the specific features of landscape structure within mining-industrial landscape-technical systems are determined both by the peculiarities of natural conditions (tectonics, geological structure, hydrological conditions, etc.) and by technological aspects (production schemes, duration and intensity of industrial processes, etc.) related to mineral resource exploitation [22]. The contemporary structure of geosystems within areas of mineral extraction and beneficiation is determined by the extraction method (open-pit or underground), the mining system applied, the intensity and duration of exploitation of mining-industrial facilities, as well as the conservation or liquidation of mining enterprises [19]. It is precisely the transformation of geosystem genesis during mineral resource development that distinguishes mining-industrial geosystems from adjacent territories. The formation of these geosystems is conditioned by the development of natural-anthropogenic processes and phenomena, including land subsidence, landslides, erosion, karst collapses, flooding, pollution, and others. The principal role in the manifestation and functioning of these geosystems is played by the correlation and dominant direction of migration flows, predominantly destructive ones [23].

Optimization of mining-industrial territories represents a complex of controlled managerial measures implemented both during mineral extraction and beneficiation to ensure more efficient use, and after the completion of mineral resource exploitation to guarantee environmental safety and the performance of other economic functions. The selection of optimization measures primarily depends on the complexity of landscape structure, the intensity of natural-anthropogenic processes, the degree of anthropogenic transformation and pollution of geosystems, the level of ecological hazard, and the amount of funding available for such measures [20]. Optimization measures for mining-industrial territories involve substantiating implementation pathways, identifying natural and socio-economic constraints, determining specific forms of environmental management, and analyzing the consequences of human activity. These measures should combine technologically advanced, economically efficient, and long-term rational exploitation of mineral deposits with the use of other natural resources, protection of geosystems from excessive anthropogenic pressure, regulation of natural-anthropogenic processes, and preservation of valuable historical-cultural and protected natural sites [21].

The outcomes of optimization of mining-industrial territories include improvement of the ecological condition of mining-industrial geosystems; regulation of the intensity of hazardous natural-anthropogenic processes; reclamation of waste dumps, settling ponds, industrial sites, and related areas; creation of optimal conditions for the revitalization of anthropogenically transformed geosystems; substantiation and implementation of geoecological monitoring systems; improvement of land-use structure and establishment of protected natural areas; as well as museumification and revalorization of historical mining heritage sites.

Conclusions

The functioning of mining-industrial landscape-technical systems exerts a significant influence on the formation of diverse landscape types belonging to the mining-industrial class. Mining-industrial landscapes should be understood as anthropogenic complexes formed as a result of the interaction between a geo-mining technical system and the environment, functioning through the use of both natural energy and the energy determined by mining technologies, and characterized by active migration of mineral and biogenic matter.

In the course of anthropogenic transformation of landscape structure under the influence of mining equipment, a complex of geoecological problems is formed. Disturbance of the lithogenic base of the territory causes the development of depressive landforms, which are particularly pronounced within quarry sections of mining-industrial territories. The condition of atmospheric air is closely associated with industrial emissions from enterprises and the functioning of industrial complexes. Surface waters undergo substantial changes in water-level regimes and loss of hydrochemical properties. Due to drainage activities within mining-industrial territories, groundwater levels significantly decline, while both quantitative and qualitative characteristics deteriorate. The soil geocomponent experiences losses of fertility and is restored only partially through reclamation measures. Significant transformations also affect vegetation cover, manifested in the replacement of natural vegetation by ruderal-wasteland communities of patchy character.

An essential task for addressing the further optimization of the mining-industrial landscape-technical systems analyzed in this study is the identification of patterns of their dynamics and development. The identified dynamic tendencies of mining-industrial landscapes should form the basis of a structural-dynamic landscape analysis of the prerequisites for rationalizing their use, while systems of measures aimed at improving the geoecological condition of the region should be formulated with consideration of the obtained analytical results.

Restoration of the landscape structure of territories disturbed by mining-industrial activities should be completed through reclamation works. The final stage of reclamation is the biological stage, which is directed toward restoring the natural landscape structure of the territory.

In implementing optimization approaches, it is advisable to apply the following principles: optimization measures should be carried out exclusively on the basis of a systemic approach encompassing structural, functional, and dynamic aspects; optimization of the territorial structure should account for landscape-ecological principles of territorial optimization; the structural aspect enables consideration of mining-industrial territories as complex landscape-technical structures resulting from anthropogenic impacts; the functional aspect involves the investigation and mandatory consideration, when selecting directions for territorial optimization, of the components of mining-industrial landscape-technical systems – waste dumps, quarries, mine structures, and the corresponding diverse mining-industrial landscapes formed on their basis; the dynamic aspect takes into account the historical characteristics of territories and their contemporary transformations.

The identified tendencies of dynamic changes in mining-industrial landscapes should serve as prerequisites for selecting directions of environmental management optimization within these territories. The criterion for territorial optimization should be the correspondence between the selected reclamation methods and the landscape structure of the territory. Of particular importance is the establishment of an ecological-landscape geoinformation monitoring system for the purpose of generalization and further optimization of territories on the basis of scientifically substantiated approaches.

Conflict of Interest

The author declare no conflict of interest regarding the publication of this manuscript. Furthermore, the author has fully adhered to ethical norms, including avoiding plagiarism, data falsification, and duplicate publication.

Authors Contribution: all authors have contributed equally to this work

AI Statement

The work does not use artificial intelligence resources.

References

1. Baranovskyi, V. A. (2001). Ecological geography and ecological cartography. Kyiv: Fitosociocenter, 252 p. (in Ukrainian)
2. Gavrylenko, O. P. (2006). Some aspects of implementing the geoecological approach to rational regional nature management. *Ecology and Rational Nature Use: Collection of Scientific Works of Sumy State Pedagogical University named after A. S. Makarenko*, 3–8. (in Ukrainian)
3. Gutsuliak, V. M. (2015). Landscape ecology. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University, 284 p. (in Ukrainian)
4. Denysyk, H. I., & Kopteva, T. S. (2021). Kryvyi Rih landscape-technical system: development, current state, and optimization paths. *Physical Geography and Geomorphology*, 105–107, 25–29. https://doi.org/10.17721/phgg.2021.1-3.03 (in English)
5. Denysyk, H. I., & Zadorozhnia, H. M. (2013). Derivative processes and phenomena in technogenic landscapes. Vinnytsia: Edelveis i K, (in Ukrainian)
6. Ivanov, Ye. A. (2012). Anthropogenization of landscapes: approaches, diagnostics, modeling. *Scientific Bulletin of Chernivtsi University. Geography Series*, 612–613, 54–59. (in Ukrainian)
7. Ivanov, Ye. A. (2009). Geocadastral studies of mining territories. Lviv: Ivan Franko National University of Lviv Publishing Center, (in Ukrainian)

8. Ivanov, Ye. A. (2007). Landscapes of mining territories. Lviv: Ivan Franko National University of Lviv Publishing Center. (in Ukrainian)
9. Kiselov, Yu. O. (1999). Justification of geo-geomorphological analysis in studying landscapes of eastern Ukraine. In Landscape as an integrating concept of the XXI century (pp. 128–130). Kyiv. (in Ukrainian)
10. Kozynska, I. P. (2009). Methods of studying mining landscapes. *Scientific Notes of Vinnytsia State Pedagogical University. Geography Series*, 18, 94–98. (in Ukrainian)
11. Koptieva, T. S. (2021). Mining landscapes of Kryvyi Rih landscape-technical system. *Man and Environment. Problems of Neoecology*, 35, 18–26. https://doi.org/10.26565/1992-4224-2021-35-02
12. Kulikovska, O. Ye. (2005). Modern aspects of monitoring anthropogenic landscapes of the Kryvyi Rih Basin. In Theoretical, regional, and applied directions of anthropogenic geography and landscape studies (pp. 214). Kryvyi Rih. (in Ukrainian)
13. Landscape studies: state, problems, prospects. (2014). Proceedings of the International Scientific Conference (24–27 September 2014). Lviv: Ivan Franko National University Publishing Center. (in Ukrainian)
14. Koptieva, T., & Denysyk, B. (2021). Quarry and dump landscape systems of Kryvorizhzhia. *SGEM 2020 Conference Proceedings*, 665–670. https://doi.org/10.5593/sgem2020/5.1/s20.082
15. Denysyk, H. I., Kazakov, V. P., & Yarkov, S. V. (2012). Syngenesis of vegetation cover in technogenic landscapes. Vinnytsia: Edelveis i K, (in Ukrainian)
16. Cherevatskyi, D., & Soldak, M. (2024). Three-dimensional brownfields: the tragedy of the mining communities. *Journal of European Economy*, 22, 556–570. https://doi.org/10.35774/jee2023.04.556
17. Orange, H. (2012). Cornish mining landscapes: public perceptions of industrial archaeology in a post-industrial society. Doctoral thesis, University College London.
18. Kopteva, T. S. (2025). Surface quarry-dump layer of mining landscapes of the Kryvyi Rih landscape-technical system. *Landscape Studies*, 7(1), 95–105. https://doi.org/10.31652/2786-5665-2025-7-95-105
19. Denysyk, H. I., & Kozynska, I. P. (2015). Industrial landscapes of uranium mining regions in Ukraine. Uman: Vizavi, (in Ukrainian)
20. Kravchenko, O. V., & Yevsieieva, O. V. (2020). Mining geoecology and geotechnologies: conceptualization and evaluation elements. *Visnyk of Dnipro University. Series: Geology, Geography*, 28(2), 112–120.
21. Sinha, N., Deb, D., & Pathak, K. (2017). Development of a mining landscape and assessment of its soil erosion potential using GIS. *Engineering Geology*, 216, 1–12.: https://doi.org/10.1016/S0013-7952(16)30493-8
22. Pawlik, M., & Rudolph, T. (2024). Concept for long-term geo-monitoring of the post-mining environment using the example of the Prosper-Haniel mine. *E3S Web of Conferences*, 526, 01009. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452601009
23. Kumar, A., Singh, R. K., & others. (2023). A brief review paper on mining subsidence and its geo-environmental impact. *Materials Today Proceedings*. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.183

The article was received by the editors 08.04.2026 The article was revised 10.05.2026
The article is recommended for printing 19.05.2026 This article published 30.05.2026

Т. С. КОПТЄВА, PhD (Науки про Землю),
доцент кафедри суспільно-економічних дисциплін і географії
e-mail: koptevatania36@hnpu.edu.ua ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-9405-1674
Харківський національний педагогічний університет імені Г.С.Сковороди,
вул. Алчевських, 29, Харків, 61000, Україна

ГЕОЕКОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ТА РОЗВИТКУ ГІРНИЧОПРОМИСЛОВИХ ЛАНДШАФТНО-ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ УКРАЇНИ

Мета. Аналіз закономірностей формування, структури та функціонування гірничопромислових ландшафтно-технічних систем України, виокремлення їх типологічних особливостей і обґрунтування напрямів оптимізації та раціонального використання в умовах сучасних геоекологічних викликів.

Методи. Спостереження, ландшафтно-геоморфологічний аналіз, картографічне моделювання із використанням ГІС-технологій (Google Earth), метод антропогенно-ландшафтного прогнозу.

Результати: Гірничопромислові території України є складними ландшафтно-технічними системами, сформованими внаслідок тривалої взаємодії природних умов і техногенних процесів. Вони

охоплюють не лише межі гірничих і земельних відводів, але й значні прилеглі території, трансформовані під впливом гірничодобувної діяльності, включаючи постмайнінгові ландшафти. Домінуючими елементами цих територій є геогірничотехнічні системи, структура яких представлена природним, технологічним та інформаційним блоками, а функціонування пов'язане з переміщенням мінеральної речовини та інтенсивними геодинамічними процесами. Встановлено, що гірничопромислові ландшафти формуються під впливом відкритого та підземного способів видобування, що визначає їх морфологічну різноманітність (кар'єрно-відвальні, шахтно-просадочні, озерно-пустирні та ін.). Криворізька ландшафтно-технічна система (КЛТС) є унікальним полігоном формування техногенних ландшафтів, де зосереджено широкий спектр їх типів. Встановлено, що антропогенні ландшафти займають значні площі, формуючи складну висотно-ландшафтну структуру з акумулятивними, денудаційно-акумулятивними та денудаційними рівнями. Виявлено, що інтенсивний розвиток гірничодобувної діяльності спричинив суттєві зміни рельєфу, гідрологічної мережі, мікроклімату, ґрунтового покриву та рослинності регіону.Особливості Донецької та Прикарпатської ландшафтно-технічних систем характеризуються високим рівнем антропогенного навантаження, значними порушеннями геосистем, активізацією екзогенних процесів та формуванням техногенних форм рельєфу. В межах Донбасу спостерігається інтенсивне забруднення ґрунтів і вод, порушення гідрогеологічного режиму та формування небезпечних геодинамічних явищ. Для Прикарпатського регіону характерні процеси повільного самовідновлення рослинності та ґрунтів, що супроводжуються значною мозаїчністю ландшафтної структури. Формування гірничопромислових ландшафтів супроводжується розвитком негативних природно-антропогенних процесів (ерозія, карст, просідання, підтоплення, забруднення), які визначають сучасний геоекологічний стан територій. Обґрунтовано, що оптимізація гірничопромислових територій має базуватися на системному підході з урахуванням структурних, функціональних і динамічних характеристик геосистем, а також передбачати рекультивацію порушених земель, розвиток геоекологічного моніторингу та раціональне природокористування.

Висновки. Гірничопромислові ландшафтно-технічні системи України є складними природно-антропогенними утвореннями, функціонування яких визначається взаємодією природних чинників і техногенних процесів; характеризуються значною трансформацією природних компонентів, формуванням специфічних морфологічних структур і активною міграцією речовини. Сучасний стан цих систем супроводжується розвитком геоекологічних проблем, що потребує впровадження комплексних заходів оптимізації, зокрема рекультивації, моніторингу та раціонального використання ресурсів. Виявлені закономірності формування і розвитку гірничопромислових ландшафтів мають стати основою для подальших досліджень і практичних заходів щодо стабілізації та відновлення порушених територій.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *гірничопромислові ландшафти, ландшафтно-технічна система, геогірничотехнічна система, техногенний ландшафт, антропогенна трансформація, рекультивація, геоекологічна оптимізація*

Конфлікт інтересів

Авторка повідомляє про відсутність конфлікту інтересів. Крім того, авторка дотримувалася етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Декларація про використання ШІ

В роботі не використано ресурс штучного інтелекту.

Список використаної літератури

1. Барановський В. А. Екологічна географія і екологічна картографія. Київ: Фітосоціоцентр, 2001. 252 с.
2.Гавриленко О. П. Деякі аспекти реалізації геоекологічного підходу до раціоналізації регіонального природокористування. *Екологія і раціональне природокористування: Збірник наукових праць Сумського державного педагогічного університету ім. А.С.Макаренка.* 2006. С. 3–8.
3. Гуцуляк В. М. Ландшафтна екологія. Х. : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2015.– 284 с.
4. Денисик Г. І., Коптєва Т. С. Криворізька ландшафтно-технічна система: розвиток, сучасний стан, шляхи оптимізації. *Фізична географія та геоморфологія.* 2021. № 105–107. С. 25–29. https://doi.org/10.17721/phgg.2021.1-3.03
5. Денисик Г. І. Задорожня Г.М. Похідні процеси та явища в ландшафтах зон техногенезу. Вінниця : ПП «Едельвейс і К», 2013. 220 с.
6. Іванов Є. А. Антропогенізація ландшафтів: підходи, діагностування, моделювання. *Наук. вісн. Чернівец. ун-ту*. Вип. 612–613 : Геогр. Чернівці, 2012. С. 54–59.
7. Іванов Є. А. Геокадастрові дослідження гірничопромислових територій : монографія. Львів : ВЦ ЛНУ ім. І. Франка, 2009. 372 с.

8. Іванов Є. А. Ландшафти гірничопромислових територій : монографія. Львів: ВЦ ЛНУ ім. І. Франка, 2007. 334 с.
9. Кисельов Ю. О. Обґрунтування еколого-геоморфологічного аналізу при вивченні ландшафтів сходу України. Ландшафт як інтегруюча концепція XXI століття. Збірник наукових праць. Київ, 1999. С.128–130.
10. Козинська І. П. Методи досліджень гірничопромислових ландшафтів. *Наукові записки ВДПУ. Серія: Географія.* Вінниця, 2009. Вип. 18. С. 94–98.
11. Koptieva T. S. Mining landscapes of Kryvyi Rih landscape technical system. *Людина та довкілля. Проблеминеоекології*. 2021. Вип. 35. С. 18–26. DOI: https://doi.org/10.26565/1992-4224-2021-35-02
12. Куліковська О. Є. Сучасні аспекти моніторингу антропогенних ландшафтів Криворізького басейну. Теоретичні, регіональні, прикладні напрямки розвитку антропогенної географії та ландшафтознавства: Матеріали II міжнародної наукової конференції. Кривий Ріг: Видавничий дім, 2005. 214 с.
13. Ландшафтознавство: стан, проблеми, перспективи: Матеріали міжнародної наукової конференції присвяченої 70-річчю заснування кафедри фізичної географії, 60-річчю діяльності Львівської школи ландшафтознавства, 110- річчю з дня народження професора К. І. Геренчука і 80-річчю з дня народження професора Г. П. Міллера (24-27 вересня 2014 р.). Львів : Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2014. 198 с.
14. Koptieva T., Denysyk B. Quarry and dump landscape systems of Kryvorizhzhia. *Surveying, Geology and Mining, Ecology and Management – SGEM 2020* : XX-th International Multidisciplinary Scientific GeoConference. Albena, 2021. Pp. 665–670. DOI: https://doi.org/10.5593/sgem2020/5.1/s20.082
15. Денисик Г. І., Казаков В. П., Ярков С. В. Сингенез рослинного покриву у ландшафтах зон техно- генезу: монографія. Вінниця: ПП «Едельвейс і К», 2012. 240 с.
16. Cherevatskyi, Danylo & Soldak, Myroslava. (2024). Three-dimensional brownfields: the tragedy of the mining communities. Journal of European Economy. Vol. 22.. 556-570. https://doi.org/10.35774/jee2023.04.556
17. Orange, H; (2012) Cornish mining landscapes: public perceptions of industrial archaeology in a post-industrial society. Doctoral thesis , UCL (University College London).
18. Коптєва Т. С. *Поверхневий кар'єрно-відвальний ярус гірничопромислових ландшафтів Криворізької ландшафтно-технічної системи. Ландшафтознавство.* 2025. 7(1). С. 95–105. DOI : https://doi.org/10.31652/2786-5665-2025-7-95-105
19. Денисик, Г. І., Козинська, І. П. Промислові ландшафти регіону видобутку уранових руд в Україні: монографія. Умань, Візаві, 2015, 282.
20. Kravchenko, O. V., & Yevsieieva, O. V. (2020). Mining geoecology and geotechnologies: Conceptualization and evaluation elements. *Visnyk of Dnipro University. Series: Geology, Geography*, 28(2), 112–120. https://geology-dnu.dp.ua/index.php/GG/article/download/941/766
21. Sinha, N., Deb, D., & Pathak, K. (2017). *Development of a mining landscape and assessment of its soil erosion potential using GIS*. *Engineering Geology, 216*, 1–12. https://doi.org/10.1016/S0013-7952(16)30493-8
22. Pawlik, M., & Rudolph, T. (2024). *Concept for long-term geo-monitoring of the post-mining environment using the example of the Prosper-Haniel mine*. *E3S Web of Conferences, 526*, 01009. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452601009
23. Kumar, A., Singh, R. K., & others. (2023). *A brief review paper on mining subsidence and its geo-environmental impact*. *Materials Today Proceedings*. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.183

Стаття надійшла до редакції 08.04.2026 Переглянуто 10.05.2026
Стаття рекомендована до друку 19.05.2026 Опубліковано 30.05.2026

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-09
УДК 504.06:628.1:620.9:711.4:519.876

В. К. ПУЗІК,[1] д-р с- г наук, чл.-кор. НААН, заслужений діяч науки і техніки України,
професор кафедри екології та біотехнологій в рослинництві
e-mail: kysmish@gmail.com ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-3890-6150

Є. А. КРИШТОП,[1] канд. с.-г. наук,
доцент кафедри екології та біотехнологій в рослинництві
e-mail: kafagroeco@ukr.net ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-2868-3101

[1] *Державний біотехнологічний університет*,
вул. Алчевських, 44, Харків, 61002, Україна

МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД ДО ПОРІВНЯЛЬНОЇ ОЦІНКИ ВОДНО-ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ НА ОСНОВІ DPSIR, ESG ТА IWE

Мета. Розробити та апробувати методичний підхід до порівняльної оцінки водно-енергетичної стійкості урбанізованих територій на основі поєднання моделі DPSIR, ESG-індикаторів та інтегрального індексу IWE.

Методи. Використано поєднання концептуального та кількісного підходів. Для структуризації взаємозв'язків між ресурсним навантаженням, станом міського середовища та управлінськими відповідями застосовано модель DPSIR (Driving forces – Pressures – State – Impact – Response). ESG-підхід використано для відбору показників, пов'язаних з екологічною результативністю та інфраструктурною модернізацією міських систем. Кількісну оцінку виконано за допомогою інтегрального індексу IWE (Integrated Water-Energy Sustainability Index), який обчислювали методом зваженої адитивної згортки з мін–макс нормалізацією показників.

Результати. До складу інтегрального індексу включено п'ять індикаторів: втрати води в мережах, енергоємність житлового фонду, питомі викиди CO_2, частку відновлюваних джерел енергії та рівень очищення стічних вод. Апробацію методики виконано на прикладі чотирьох великих міст України – Києва, Львова, Харкова та Дніпра. Для перевірки стійкості моделі проведено аналіз чутливості шляхом варіювання вагових коефіцієнтів. Найвище значення індексу зафіксовано для Львова, що зумовлено нижчою енергоємністю житлового фонду, найнижчими питомими викидами CO_2, вищою часткою відновлюваних джерел енергії та найвищим рівнем очищення стічних вод серед досліджуваних міст. Найнижче значення отримано для Харкова, що пов'язано з найбільшими втратами води, найвищою енергоємністю житлового фонду, вищими питомими викидами CO_2 та найнижчою часткою відновлюваних джерел енергії. Київ і Дніпро продемонстрували проміжні значення індексу. Аналіз чутливості показав, що варіювання вагових коефіцієнтів у межах заданих сценаріїв не змінює підсумкового ранжування міст, що свідчить про відносну стійкість моделі. Встановлено, що найбільший вплив на міжміську диференціацію індексу мають показники, пов'язані з енергетичним переходом та екологічною інфраструктурою, насамперед частка відновлюваних джерел енергії та рівень очищення стічних вод.

Висновки. Запропонований методичний підхід дає змогу поєднати водний та енергетичний компоненти міської стійкості в межах єдиної кількісної схеми оцінювання. Інтегральний індекс може застосовуватися як інструмент порівняльного аналізу урбанізованих територій, муніципального моніторингу ресурсоефективності та визначення пріоритетів модернізації водної й енергетичної інфраструктури. Практична цінність підходу полягає в можливості його використання за умов обмеженої доступності уніфікованих муніципальних даних.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *водно-енергетичний зв'язок, водно-енергетична стійкість, DPSIR, ESG, інтегральний індекс IWE, урбанізована територія*

Як цитувати: Пузік В. К., Криштоп Є. А. Методичний підхід до порівняльної оцінки водно-енергетичної стійкості урбанізованих територій на основі DPSIR, ESG ТА IWE. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2026. Вип. 34. С. 125-135. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-09

© Пузік В. К.,. Криштоп Є. А., 2026
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0

In cites: Puzik, V. K., & Kryshtop, Y. A. (2026). A methodological approach to comparative assessment of water–energy sustainability of urbanized areas based on DPSIR, ESG and IWE. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology,* (34), 125-135. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-09 (in Ukrainian)

Вступ

Урбанізовані території концентрують основні потоки споживання водних і енергетичних ресурсів та водночас формують значну частку антропогенного навантаження на довкілля. Зростання чисельності міського населення, зношеність інженерної інфраструктури, підвищення енергоємності житлового фонду, збільшення обсягів стічних вод і викидів парникових газів актуалізують потребу в інструментах оцінювання, які дають змогу аналізувати міські ресурсні системи комплексно, а не в межах окремих секторів [1–6].

У сучасній науковій літературі взаємозв'язок водних та енергетичних ресурсів розглядається в межах концепції water–energy nexus. У праці Bazilian et al. [7] обґрунтовано необхідність інтегрованого підходу до моделювання взаємопов'язаних ресурсних систем, що дозволяє враховувати міжсекторальні ефекти при прийнятті управлінських рішень. Lund et al. [8], розвиваючи концепцію smart energy systems, показали, що ефективне управління міськими системами потребує узгодження енергетичних потоків, інфраструктури та режимів споживання. У роботі Ramos et al. [9] увагу зосереджено на управлінських стратегіях водно-енергетичного зв'язку в розумних містах, зокрема на інфраструктурних рішеннях, спрямованих на підвищення ресурсоефективності.

Окремий напрям досліджень стосується оцінювання водної та енергетичної ефективності інфраструктури. Alegre et al. [10] запропонували систему індикаторів для оцінки функціонування систем водопостачання, що створює підґрунтя для порівняльного аналізу міських мереж. Connolly et al. [11] розглянули технічні та економічні аспекти інтеграції відновлюваної енергетики в європейські енергетичні системи, а Kazmierczak and Carter [12] та Kabisch et al. [13] показали значення природоорієнтованих рішень для підвищення стійкості міського середовища. У сукупності ці праці демонструють, що водний та енергетичний компоненти міської стійкості тісно пов'язані, однак у більшості випадків аналізуються в різних дослідницьких рамках.

Останніми роками зростає увага до використання ESG-підходів у сфері управління ресурсами. У дослідженні Chen et al. [14] ESG-фактори розглядаються як важливий елемент оцінювання ризиків у взаємопов'язаних ресурсних системах. Водночас стандарти GRI [15] надають інструментарій для формалізації екологічних показників у практиці звітності та моніторингу. Однак застосування ESG у міському ресурсному аналізі переважно має концептуальний характер і лише частково реалізоване у вигляді систем кількісних індикаторів, придатних для міжміського порівняння.

Таким чином, аналіз літератури свідчить про наявність кількох невирішених питань. По-перше, у наявних дослідженнях відсутній узгоджений інструмент, який би інтегрував водний і енергетичний сектори міста в єдину кількісну метрику. По-друге, більшість підходів орієнтована або на національний рівень, або на окремі інфраструктурні підсистеми, що ускладнює їх застосування для порівняльної оцінки урбанізованих територій. По-третє, ESG-компонент у більшості робіт не інтегровано безпосередньо в систему показників оцінювання водно-енергетичної стійкості міст.

Метою є розроблення та апробація методичного підходу до порівняльної оцінки водно-енергетичної стійкості урбанізованих територій на основі поєднання моделі DPSIR, ESG-індикаторів та інтегрального індексу IWE на прикладі чотирьох міст України.

Наукова новизна роботи полягає у формалізації підходу до оцінювання водно-енергетичної стійкості міст, у межах якого поєднано логіку DPSIR, систему ESG-показників та інтегральний індекс IWE як інструмент порівняльного аналізу на міському рівні. На відміну від індексів, що орієнтовані переважно на макрорівень або окремі ресурсні підсистеми, запропонований підхід спрямований на інтегровану оцінку водного та енергетичного компонентів у межах урбанізованої системи.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання запропонованого підходу для муніципаль-

ного моніторингу ресурсоефективності, порівняльної оцінки міських систем за умов обмеженої доступності уніфікованих даних, а також для обґрунтування пріоритетів модернізації водної та енергетичної інфраструктури.

Методика дослідження

Для порівняльної оцінки водно-енергетичної стійкості урбанізованих територій використано комбінований методичний підхід, який поєднує концептуальне структурування показників у межах моделі DPSIR (Driving forces – Pressures – State – Impact – Response) [16], їх інтерпретацію з позицій ESG-підходу та подальше агрегування в інтегральний індекс IWE (Integrated Water-Energy Sustainability Index). Така схема дає змогу перейти від якісного опису стану міських ресурсних систем до їх кількісної порівняльної оцінки за єдиним набором індикаторів.

У межах методики DPSIR вико0ристано для логічного групування показників за трьома функціональними блоками: ресурсний тиск на систему, екологічний стан та управлінська відповідь. ESG-підхід застосовано як рамку для добору показників, пов'язаних з екологічною результативністю міської інфраструктури, ресурсоефективністю та модернізаційними рішеннями. До складу індексу IWE включено п'ять індикаторів, які відображають водний та енергетичний компоненти стійкості міста (табл. 1).

Таблиця 1

Система індикаторів інтегрального індексу IWE

Table 1

System of indicators of the integrated IWE index

Позначення	Індикатор	Одиниця виміру	Тип показника	Компонент DPSIR	ESG-вимір	Джерельна основа
X_1	Втрати води в мережах	%	дестимулятор	Pressure	E	IWA, Держстат, звіти водоканалів
X_2	Енергоємність житлового фонду	кВт·год/м²	дестимулятор	Pressure	E	IEA, аналітичні оцінки, статистичні матеріали
X_3	Питомі викиди CO_2	т/особу	дестимулятор	State	E	IEA, C40
X_4	Частка ВДЕ	%	стимулятор	Response	E/G	IRENA, Eurostat
X_5	Рівень очищення стічних вод	%	стимулятор	Response	E/G	EEA, Держстат, галузеві звіти

Інформаційну базу дослідження сформовано на основі відкритих статистичних, аналітичних і методичних джерел. Для обґрунтування вибору показників та меж їх нормалізації використано матеріали International Energy Agency, C40 Cities Climate Leadership Group, European Environment Agency, International Renewable Energy Agency, Eurostat, International Water Association, Державної служби статистики України та інші відкриті джерела, наведені у списку літератури рукопису. Апробацію методики виконано на прикладі чотирьох великих міст України – Києва, Львова, Харкова та Дніпра. Їх вибір зумовлений значенням цих міст як великих урбанізованих центрів із різними параметрами водної та енергетичної інфраструктури, що дає змогу продемонструвати можливості порівняльного застосування індексу IWE. Вихідні значення індикаторів, використані для розрахунку інтегрального індексу, наведено в табл. 2.

Для забезпечення порівнюваності різнорідних показників застосовано мін–макс нормалізацію. Граничні значення Xmin та Xmax встановлено на основі узагальнених статистичних та аналітичних джерел і використано як єдину benchmark-базу для всіх досліджуваних міст (табл. 3).

Нормалізацію виконано окремо для дестимулюючих і стимулюючих показників. Для дестимуляторів, збільшення яких свідчить про погіршення стану системи (втрати води, енергоємність, питомі викиди CO_2), використано формулу:

$$N_i = (Xmax - X_i) / (Xmax - Xmin).$$

Таблиця 2

Вихідні значення індикаторів для розрахунку IWE

Table 2

Input indicator values for IWE calculation

Місто	Втрати води X_1, %	Енергоємність X_2, кВт·год/м²	CO_2 X_3, т/особу	ВДЕ X_4, %	Очищення X_5, %
Київ	28,0	145,0	4,20	18,0	82,0
Львів	32,0	130,0	3,60	24,0	88,0
Харків	38,0	160,0	5,10	11,0	74,0
Дніпро	35,0	155,0	4,80	14,0	78,0

Таблиця 3

Межі нормалізації показників інтегрального індексу IWE

Table 3

Normalization bounds of the integrated IWE index indicators

Індикатор	Xmin	Xmax	Джерело
Втрати води, %	10	50	IWA [10, 23]
Енергоємність, кВт·год/м²	80	200	IEA [1]
CO_2, т/особу	2,0	8,0	IEA [1], C40 [2]
Частка ВДЕ, %	5	40	IRENA [22], Eurostat [19]
Рівень очищення, %	50	100	EEA [16]

Для стимуляторів, зростання яких інтерпретується як позитивна характеристика системи (частка ВДЕ, рівень очищення стічних вод), застосовано формулу:

$$N_i = (X_i - Xmin) / (Xmax - Xmin),$$

де X_i – фактичне значення і-го показника для відповідного міста; Xmin та Xmax – нижня і верхня межі нормалізації; N_i – нормалізоване значення показника в інтервалі від 0 до 1.

Після нормалізації показники агреговано в інтегральний індекс водно-енергетичної стійкості IWE методом зваженої адитивної згортки:

$$IWE = \Sigma(w_i \cdot N_i),\ i = 1\ldots n,$$

де w_i – ваговий коефіцієнт і-го індикатора; N_i – його нормалізоване значення; n – кількість показників.

У базовому сценарії використано вагові коефіцієнти, наведені в табл. 4. Їх розподіл відображає відносну значущість індикаторів у системі оцінювання: більшу вагу надано втратам води як прямому індикатору інфраструктурної неефективності, тоді як для енергоємності, викидів CO_2 та частки ВДЕ встановлено однакові ваги, що забезпечує баланс між енергетичним і кліматичним вимірами. Для показника очищення стічних вод використано дещо нижчу вагу через його вужче функціональне охоплення в межах інтегральної моделі.

Таблиця 4

Вагові коефіцієнти показників індексу IWE

Table 4

Weight coefficients of the IWE index indicators

Показник	Позначення	Вага w_i
Втрати води	X_1	0,25
Енергоємність житлового фонду	X_2	0,20
Питомі викиди CO_2	X_3	0,20
Частка ВДЕ	X_4	0,20
Рівень очищення стічних вод	X_5	0,15
Сума		1,00

Для перевірки стійкості отриманих результатів проведено однофакторний аналіз чутливості. Він полягав у варіюванні ваг окремих показників у межах ±0,05 із пропорційним коригуванням решти коефіцієнтів за умови збереження їх суми на рівні 1,00.

Для кожного сценарію повторно обчислювали значення індексу IWE та перевіряли, чи змінюється підсумкове ранжування міст. Такий підхід дає змогу оцінити залежність результатів від прийнятої структури ваг і визначити, наскільки стійкою є модель до зміни припущень щодо відносної важливості окремих індикаторів.

Розрахунок має ілюстративно-прикладний характер і спрямований на демонстрацію можливості використання індексу IWE для порівняльної оцінки урбанізованих територій в умовах обмеженої доступності уніфікованих муніципальних даних.

За такої постановки завдання індекс розглядається не як остаточна універсальна метрика, а як інструмент аналітичного впорядкування та порівняння ключових характеристик водно-енергетичної стійкості міських систем.

Результати дослідження та обговорення

На основі вихідних значень індикаторів, наведених у розділі Методика дослідження, для кожного з чотирьох міст виконано мін–макс нормалізацію показників та розраховано інтегральний індекс водно-енергетичної стійкості IWE. Нормалізовані значення N_1–N_5, зважені внески окремих індикаторів у підсумкове значення індексу та отримані значення IWE наведено в табл. 5.

Отримані значення інтегрального індексу IWE варіюють у межах від 0,34 до 0,60, що вказує на помітну диференціацію

Таблиця 5

Розрахунок інтегрального індексу водно-енергетичної стійкості урбанізованих територій (IWE)

Table 5

Calculation of the integrated water-energy sustainability index (IWE)

Місто	Втрати води X_1, %	Енергоємність X_2, кВт·год/м²	CO_2 X_3, т/особу	ВДЕ X_4, %	Очищення X_5, %	N_1–N_5 (норм.)	$w_1 \cdot N_1$–$w_5 \cdot N_5$	IWE
Київ	28,0	145,0	4,20	18,0	82,0	0,55; 0,46; 0,63; 0,37; 0,64	0,14; 0,09; 0,13; 0,07; 0,10	0,53
Львів	32,0	130,0	3,60	24,0	88,0	0,45; 0,58; 0,73; 0,54; 0,76	0,11; 0,12; 0,15; 0,11; 0,11	0,60
Харків	38,0	160,0	5,10	11,0	74,0	0,30; 0,33; 0,48; 0,17; 0,48	0,07; 0,07; 0,10; 0,03; 0,07	0,34
Дніпро	35,0	155,0	4,80	14,0	78,0	0,38; 0,38; 0,53; 0,26; 0,56	0,10; 0,08; 0,11; 0,05; 0,08	0,41

рівня водно-енергетичної стійкості досліджуваних урбанізованих територій. Найвище значення зафіксовано для Львова (0,60), найнижче – для Харкова (0,34), тоді як Київ і Дніпро посідають проміжні позиції з показниками 0,53 та 0,41 відповідно. Таким чином, навіть у межах обмеженої вибірки спостерігається суттєва міжміська варіативність за основними параметрами водної та енергетичної ефективності.

Для Києва відносно високе значення IWE зумовлене насамперед меншими втратами води порівняно з більшістю інших досліджених міст, а також відносно високим рівнем очищення стічних вод. Водночас частка відновлюваних джерел енергії залишається нижчою, ніж у Львові, що обмежує підсумкове значення індексу. У Львові найкращий результат забезпечується сукупністю кількох переваг: найнижчою серед досліджених міст енергоємністю житлового фонду, найнижчим рівнем питомих викидів CO_2, найвищою часткою ВДЕ та найвищим рівнем очищення стічних вод. Це свідчить про більш збалансовану конфігурацію водного та енергетичного компонентів стійкості.

Для Харкова отримано найнижче значення IWE, що пояснюється несприятливим поєднанням одразу кількох показників: найбільшими втратами води, найвищою енергоємністю житлового фонду, найвищими питомими викидами CO_2 та найнижчою часткою відновлюваних джерел енергії серед досліджуваних міст. У Дніпрі зафіксовано проміжний результат: жоден із показників не є критично найгіршим, однак поєднання середніх або відносно слабких значень за кількома індикаторами одночасно формує нижчий інтегральний результат порівняно з Києвом і Львовом.

Структура зважених внесків у табл. 5 показує, що найбільший диференційний

вплив на підсумковий індекс мають показники, пов'язані з енергетичним переходом та екологічною інфраструктурою, насамперед частка відновлюваних джерел енергії та рівень очищення стічних вод. Саме за цими індикаторами міжміські відмінності мають найбільшу вираженість, що істотно впливає на ранжування досліджуваних урбанізованих територій. Водночас показники втрат води та енергоємності житлового фонду визначають інфраструктурну ефективність систем і також суттєво впливають на підсумкові значення індексу.

Для узагальнення результатів розрахунку здійснено ранжування міст за значенням інтегрального індексу IWE (табл. 6). Отриманий рейтинг має вигляд: Львів > Київ > Дніпро > Харків. Він відображає не лише різницю у значеннях індексу, а й різну конфігурацію чинників, що формують водно-енергетичну стійкість міських систем.

Наведене ранжування дає змогу виявити пріоритетні напрями підвищення стійкості для кожного міста. Для Львова подальший потенціал пов'язаний переважно з утриманням і розвитком досягнутих параме-

Таблиця 6

Ранжування міст за інтегральним індексом водно-енергетичної стійкості

Table 6

Ranking of cities by the integrated water-energy sustainability index

Позиція	Місто	IWE	Ключові чинники позиції
1	Львів	0,60	Висока частка ВДЕ; найнижча енергоємність і CO_2; найвищий рівень очищення стічних вод
2	Київ	0,53	Відносно нижчі втрати води та достатньо високий рівень очищення; нижча частка ВДЕ порівняно зі Львовом
3	Дніпро	0,41	Проміжні значення за більшістю показників; частка ВДЕ та рівень очищення є головними обмежувальними чинниками
4	Харків	0,34	Найвищі втрати води, найвища енергоємність і CO_2; найнижча частка ВДЕ

трів ресурсоефективності. Для Києва одним із ключових резервів є підвищення частки ВДЕ в енергобалансі. Для Дніпра актуальними залишаються модернізація систем очищення стічних вод та посилення енергетичного переходу. Для Харкова найбільш критичними є зниження втрат води, підвищення енергоефективності житлового фонду та нарощування частки відновлюваної енергетики. Таким чином, індекс IWE дозволяє не лише ранжувати міста, а й визначати індивідуальні напрями управлінського реагування.

Для перевірки стійкості моделі до зміни вагових коефіцієнтів проведено однофакторний аналіз чутливості. Результати наведено в табл. 7. У межах базового сценарію та чотирьох варіантів варіювання ваг підсумкове ранжування міст не змінюється: у всіх сценаріях зберігається послідовність Львів > Київ > Дніпро > Харків. Це свідчить про відносну стійкість отриманих висновків до помірної зміни структури ваг.

Зміна ваг окремих показників у межах ±0,05 призводить лише до незначних коливань абсолютних значень індексу, але не змінює відносних позицій міст. Найбільша чутливість спостерігається при зміні ваг показників, що характеризують втрати води та рівень очищення стічних вод, однак навіть у цих сценаріях загальна конфігурація результатів залишається сталою. Це дозволяє вважати запропонований індекс достатньо робастним для цілей порівняльного аналізу в межах заданої вибірки.

Таблиця 7

Результати аналізу чутливості інтегрального індексу IWE до варіювання вагових коефіцієнтів

Table 7

Sensitivity analysis results for the IWE index under varying weighting coefficients

Сценарій	Київ	Львів	Харків	Дніпро	Рейтинг міст
Базовий [0,25; 0,20; 0,20; 0,20; 0,15]	0,53	0,60	0,34	0,41	Л > К > Д > Х
S1: $w_1 = 0,30$	0,53	0,59	0,35	0,42	Л > К > Д > Х
S2: $w_1 = 0,20$	0,52	0,60	0,34	0,41	Л > К > Д > Х
S3: $w_4 = 0,25$	0,52	0,60	0,34	0,41	Л > К > Д > Х
S4: $w_5 = 0,20$	0,51	0,58	0,33	0,40	Л > К > Д > Х

Отримані результати підтверджують можливість використання інтегрального індексу IWE для порівняльної оцінки водно-енергетичної стійкості урбанізованих територій. Індекс дає змогу агрегувати різнорідні показники водної, енергетичної та екологічної ефективності в єдину кількісну метрику, яка зберігає чутливість до міжміських відмінностей та дозволяє виявляти ключові обмежувальні чинники для кожної досліджуваної системи. У межах цієї апробації найкращі результати продемонстрували міста з вищим рівнем енергетичного переходу та екологічної інфраструктурної модернізації, тоді як нижчі позиції характерні для міст із більшими ресурсними втратами та вищою енергоємністю.

Отримані результати підтверджують доцільність використання інтегрального підходу до оцінки водно-енергетичної стійкості урбанізованих територій. На відміну від практики роздільного аналізу водного та енергетичного секторів, застосований у роботі підхід дозволив розглянути їх як взаємопов'язані компоненти єдиної міської ресурсної системи. Це особливо важливо для урбанізованих територій, де втрати води, енергоємність житлового фонду, структура енергопостачання та рівень очищення стічних вод формують не ізольовані, а взаємозалежні характеристики інфраструктурної стійкості.

Інтерпретація результатів у межах DPSIR-логіки показує, що включені до індексу IWE показники відображають різні функціональні аспекти міської системи. Втрати води в мережах та енергоємність житлового фонду характеризують ресурсний тиск на інфраструктуру, питомі викиди CO_2 – екологічний стан системи, а частка відновлюваних джерел енергії та рівень очищення стічних вод – управлінські відповіді, спрямовані на зниження екологічного навантаження та модернізацію міських сервісів. У такому трактуванні інтегральний індекс IWE дає змогу оцінювати не лише поточний рівень ресурсної ефективності, а й співвідношення між проблемними параметрами системи та інструментами їх компенсації.

Порівняльний розрахунок для Києва, Львова, Харкова та Дніпра засвідчив, що міжміська диференціація формується не одним домінуючим показником, а конфігурацією кількох індикаторів одночасно. Найвище значення IWE для Львова пов'язане з більш збалансованим поєднанням енергоефективності, нижчих викидів CO_2, вищої частки ВДЕ та кращих параметрів очищення стічних вод. Для Харкова, навпаки, характерне накопичення несприятливих значень за кількома дестимулюючими показниками, що знижує підсумковий інтегральний результат. Таким чином, індекс IWE виявляє не лише рівень водно-енергетичної стійкості, а й тип проблемної конфігурації міської системи.

Отримані результати загалом узгоджуються з положеннями сучасних досліджень water–energy nexus. Зокрема, у праці Bazilian et al. обґрунтовано необхідність інтегрованого розгляду взаємопов'язаних ресурсних систем, а в дослідженні Ramos et al. показано значення управлінських стратегій для підвищення ефективності міських водно-енергетичних зв'язків [7, 9]. Разом із тим у зазначених роботах основна увага приділяється концептуальним або секторальним аспектам, тоді як питання побудови компактної кількісної метрики для міжміського порівняння висвітлене обмежено. У цьому контексті запропонований індекс IWE можна розглядати як інструмент операціоналізації nexus-підходу на рівні порівняльного міського аналізу.

Важливим результатом роботи є також інтеграція ESG-підходу в систему кількісного оцінювання. У дослідженні Chen et al. ESG-фактори розглядаються як значущий елемент аналізу ризиків у взаємопов'язаних ресурсних системах [14], однак у більшості таких підходів ESG залишається рамковою концепцією, а не безпосередньо інтегрованою частиною розрахункової моделі. У запропонованій методиці ESG-показники не використовуються декларативно, а включені до структури індексу через конкретні індикатори екологічної інфраструктури та енергетичного переходу. Це підвищує прикладну цінність моделі, оскільки дає змогу пов'язати порівняльну оцінку міст із практиками муніципального моніторингу та екологічно орієнтованого управління.

Порівняно з інтегральними індексами, орієнтованими переважно на національний рівень або широкий спектр макропоказників, запропонований підхід має кілька переваг. По-перше, він зосереджений саме на міському рівні, де інфраструктурні характеристики є більш релевантними для оцінки ресурсної стійкості. По-друге, він поєднує водний

та енергетичний блоки в межах єдиної моделі. По-третє, індекс IWE є достатньо компактним і може бути використаний за умов обмеженої доступності уніфікованих муніципальних даних. Саме ця компактність робить його зручним для апробаційного аналізу та для застосування в умовах, коли повні масиви локальної статистики недоступні або фрагментарні.

Водночас результати роботи слід інтерпретувати з урахуванням її обмежень. Насамперед це стосується використання узагальнених benchmark-діапазонів для нормалізації показників і застосування обмеженої вибірки міст. Крім того, не всі вихідні показники однаково забезпечені повними та уніфікованими муніципальними даними, що зумовлює певний рівень умовності при порівнянні. Вагові коефіцієнти в базовому сценарії встановлено в межах авторської методичної схеми, тому, хоча аналіз чутливості й підтвердив стабільність ранжування, подальша верифікація моделі потребує тестування на розширених наборах даних і з використанням альтернативних процедур зважування.

Окремо варто підкреслити, що сильна сторона індексу IWE полягає не у претензії на універсальне заміщення інших підходів до оцінювання сталості, а у його здатності виконувати функцію прикладного аналітичного інструменту. Індекс може використовуватися для первинного порівняльного скринінгу міст, виявлення ключових слабких місць водної та енергетичної інфраструктури, а також для попереднього обґрунтування напрямів модернізації. У цьому сенсі його практична цінність полягає у поєднанні відносної простоти розрахунку та аналітичної змістовності результату.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на кілька напрямів. По-перше, необхідною є апробація індексу IWE на більшій кількості міст із використанням стандартизованих муніципальних даних за зіставні часові інтервали. По-друге, перспективним є включення просторового компонента оцінювання, зокрема через поєднання індексу з GIS-аналізом для врахування територіальної неоднорідності міських систем. По-третє, доцільно перевірити, якою мірою зміна набору показників або застосування альтернативних методів вагового оцінювання впливає на стабільність моделі. Це дозволить підвищити аналітичну надійність індексу та розширити сферу його практичного застосування.

Загалом проведене дослідження показало, що поєднання DPSIR-моделі, ESG-підходу та інтегрального індексу IWE є продуктивним для порівняльної оцінки водно-енергетичної стійкості урбанізованих територій. Запропонована модель не претендує на вичерпне охоплення всіх параметрів міського розвитку, однак вона дозволяє впорядкувати ключові характеристики ресурсної ефективності в межах єдиної аналітичної схеми та створює підґрунтя для подальшого розвитку кількісних підходів до оцінювання стійкості міст.

Висновки

Запропоновано методичний підхід до порівняльної оцінки водно-енергетичної стійкості урбанізованих територій, який поєднує модель DPSIR, ESG-індикатори та інтегральний індекс IWE, дозволяє узгодити показники, що характеризують ресурсний тиск, екологічний стан і управлінські відповіді, в межах єдиної схеми кількісного аналізу.

Апробація індексу IWE на прикладі Києва, Львова, Харкова та Дніпра показала, що значення водно-енергетичної стійкості досліджуваних міст варіюють у межах від 0,34 до 0,60. Найвище значення індексу отримано для Львова, найнижче – для Харкова, тоді як Київ і Дніпро займають проміжні позиції. Отримане ранжування відображає міжміські відмінності у поєднанні водної, енергетичної та екологічної ефективності.

Встановлено, що найбільший вплив на диференціацію значень інтегрального індексу мають показники, пов’язані з енергетичним переходом та екологічною інфраструктурою, насамперед частка відновлюваних джерел енергії та рівень очищення стічних вод. Поряд із цим суттєве значення для формування підсумкового результату мають втрати води в мережах та енергоємність житлового фонду, які відображають рівень інфраструктурної неефективності міських систем.

Аналіз чутливості показав, що за варіювання вагових коефіцієнтів у межах заданих сценаріїв підсумкове ранжування міст не змінюється, що свідчить про відносну стійкість

моделі до помірної зміни параметрів зважування. Це дає підстави розглядати індекс IWE як придатний інструмент для порівняльного аналітичного оцінювання водно-енергетичної стійкості урбанізованих територій.

Практичне значення запропонованого підходу полягає у можливості його використання для муніципального моніторингу ресурсоефективності, виявлення ключових обмежувальних чинників розвитку міської інфраструктури та обґрунтування пріоритетів модернізації водного й енергетичного секторів. За умов обмеженої доступності уніфікованих даних індекс IWE може виконувати функцію прикладного інструменту первинної порівняльної оцінки міських систем.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з апробацією індексу IWE на ширшій вибірці міст, уточненням набору показників і вагових коефіцієнтів, а також інтеграцією просторового аналізу для врахування територіальної неоднорідності урбанізованих систем.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису немає. Автори дотримувалися етичних норм, включаючи недопущення плагіату, фальсифікації даних і подвійної публікації.

Внесок авторів. Усі автори зробили рівний внесок у підготовку роботи.

Декларація про використання ШІ

Генеративні інструменти ChatGPT-5.5 (OpenAI, 2026) використовувалися для мовного редагування та технічного форматування тексту; зміст, аналіз і висновки належать авторам.

Список використаної літератури

1. International Energy Agency. World Energy Outlook 2023. Paris: IEA, 2023. 358 p. URL: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023 (дата звернення 28.03.2026)
2. C40 Cities Climate Leadership Group. Deadline 2020: How Cities Will Get the Job Done. London: C40, 2020. 68 p. URL: https://www.c40.org/researches/deadline-2020 (дата звернення 28.03.2026)
3. United Nations, Department of Economic and Social Affairs. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. New York: UN, 2019. 126 p. URL: https://population.un.org/wup/ (дата звернення 28.03.2026)
4. UN-Habitat. World Cities Report 2022: Envisaging the Future of Cities. Nairobi: United Nations Human Settlements Programme, 2022. 392 p. URL: https://unhabitat.org/wcr/ (дата звернення 28.03.2026)
5. Кіптач Ф. Я. Оцінка стану довкілля України: методи та результати. Регіональна економіка. 2025. № 2. С. 26–38. URL: https://re.gov.ua/re202502/re202502_026_KiptachFYa.pdf
6. Державна служба статистики України. Офіційні статистичні дані. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/ (дата звернення 28.03.2026)
7. Bazilian M., Rogner H., Howells M., Hermann S., Arent D., Gielen D., Steduto P., Mueller A., Komor P., Tol R. S. J., Yumkella K. K. Considering the energy, water and food nexus: towards an integrated modelling approach. Energy Policy. 2011. Vol. 39. P. 7896–7906. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.039
8. Lund H., Østergaard P. A., Connolly D., Mathiesen B. V. Smart energy and smart energy systems. Energy. 2017. Vol. 137. P. 556–565. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.123
9. Ramos H. M., Giralt L., López-Jiménez P. A., Pérez-Sánchez M. Water-energy nexus management strategy towards sustainable mobility goal in smart cities. Urban Water Journal. 2023. Vol. 20, No. 10. P. 1406–1417. https://doi.org/10.1080/1573062X.2021.1973041
10. Alegre H., Baptista J. M., Cabrera E., Cubillo F., Duarte P., Hirner W., Merkel W., Parena R. Performance indicators for water supply services. 3rd ed. London: IWA Publishing, 2016. 312 p.URL; https://www.researchgate.net/publication/221936068_Performance_Indicators_for_Water_Supply_Services (дата звернення 28.03.2026)
11. Connolly D., Lund H., Mathiesen B. V. Smart energy Europe: the technical and economic impact of one potential 100 % renewable energy scenario for the European Union. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 60. P. 1634–1653. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.02.025
12. Kazmierczak A., Carter J. Adaptation to climate change using green and blue infrastructure: a database of case studies. Manchester: University of Manchester, 2010. 42 p. URL: https://www.grabs-eu.org/membersArea/files/databaseFinalReport.pdf (дата звернення 28.03.2026)
13. Kabisch N., Korn H., Stadler J., Bonn A. (eds.). Nature-based solutions to climate change adaptation in urban areas. Cham: Springer, 2017. 337 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56091-5
14. Chen H., Zhang Y., Liu Z., Wang X., Li J. Assessing environmental, social, and governance risks in the water–energy–land–food nexus. Land. 2025. Vol. 14, No. 4. Article 669. https://doi.org/10.3390/land14040669

15. Global Reporting Initiative. GRI 303: Water and effluents 2018; GRI 302: Energy 2016. Amsterdam: Global Reporting Initiative, 2018. URL: https://www.globalreporting.org/standards/ (дата звернення 28.03.2026)
16. European Environment Agency. DPSIR framework for state of the environment reporting. Copenhagen: EEA, 2022. URL: https://www.eea.europa.eu/publications/92-9167-059-6-sum (дата звернення 28.03.2026)

Стаття надійшла до редакції 03.04.2026 Переглянуто 05.05.2025
Стаття рекомендована до друку 07.05.2026 Опубліковано 30.05.2026

V. K. PUZIK[1], DSc (Agriculture),
Corresponding Member of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine,
Honored Worker of Science and Technology of Ukraine,
Professor of the Department of Ecology and Biotechnology in Crop Production
E-mail: kysmish@gmail.com ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-3890-6150

Y. A. KRYSHTOP[1], PhD (Agriculture),
Associate Professor of the Department of Ecology and Biotechnology in Crop Production
E-mail: kafagroeco@ukr.net ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-2868-3101

[1] *State Biotechnological University*,
44, Alchevskykh Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

A METHODOLOGICAL APPROACH TO COMPARATIVE ASSESSMENT OF WATER–ENERGY SUSTAINABILITY OF URBANIZED AREAS BASED ON DPSIR, ESG AND IWE

Purpose. To develop and test a methodological approach to the comparative assessment of water-energy sustainability of urbanized areas based on the integration of the DPSIR model, ESG indicators, and the integrated IWE index.

Methods. The study combines conceptual and quantitative approaches. The DPSIR model (Driving forces – Pressures – State – Impact – Response) was applied to structure the relationships between resource pressure, the condition of the urban environment, and management responses. The ESG approach was used to select indicators related to environmental performance and infrastructural modernization of urban systems. Quantitative assessment was carried out using the integrated IWE (Integrated Water-Energy Sustainability Index), calculated by a weighted additive aggregation method with min–max normalization of indicators.

Results. The index includes five indicators: water losses in distribution networks, energy intensity of the housing sector, specific CO_2 emissions, the share of renewable energy sources, and the wastewater treatment rate. The methodology was tested on four major Ukrainian cities: Kyiv, Lviv, Kharkiv, and Dnipro. A sensitivity analysis was performed by varying the weighting coefficients in order to assess the stability of the model. The highest IWE value was obtained for Lviv, which is associated with lower energy intensity of the housing sector, the lowest specific CO_2 emissions, a higher share of renewable energy sources, and the highest wastewater treatment rate among the studied cities. The lowest value was obtained for Kharkiv, due to the highest water losses, the highest energy intensity of the housing sector, higher specific CO_2 emissions, and the lowest share of renewable energy sources. Kyiv and Dnipro demonstrated intermediate values. The sensitivity analysis showed that varying the weighting coefficients within the defined scenarios did not change the final ranking of the cities, indicating the relative stability of the model. It was found that the greatest contribution to intercity differentiation of the index is made by indicators related to energy transition and environmental infrastructure, primarily the share of renewable energy sources and the wastewater treatment rate.

Conclusions. The proposed methodological approach makes it possible to integrate the water and energy components of urban sustainability within a unified quantitative assessment framework. The IWE index can be used as a tool for comparative analysis of urbanized areas, municipal monitoring of resource efficiency, and identification of priorities for modernization of water and energy infrastructure. The practical value of the approach lies in the possibility of its application under conditions of limited availability of standardized municipal data.

KEYWORDS: *water-energy nexus, water-energy sustainability, DPSIR, ESG, integrated IWE index, urbanized areas*

Conflict of Interest

The authors declares no conflict of interest regarding the publication of this manuscript. Furthermore, the author have fully adhered to ethical norms, including avoiding plagiarism, data falsification, and duplicate publication.

Authors Contribution: all authors have contributed equally to this work

AI Statement

Generative ChatGPT-5.5 (OpenAI, 2026) tools were used for language editing and technical formatting of the text; the content, analysis, and conclusions are the authors'.

References

1. International Energy Agency. (2023). World Energy Outlook Paris: IEA Retrieved from https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023
2. C40 Cities Climate Leadership Group. (2020). Deadline 2020: How Cities Will Get the Job Done. London: C40, 68 p. Retrieved from https://www.c40.org/researches/deadline-2020
3. United Nations, Department of Economic and Social Affairs. (2019). World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. New York: UN, Retrieved from: https://population.un.org/wup/
4. UN-Habitat. (2022). World Cities Report 2022: Envisaging the Future of Cities. Nairobi: United Nations Human Settlements Programme, . Retrieved from https://unhabitat.org/wcr/
5. Kiptach F. Ya. (2025). Assessment of the environmental state of Ukraine: methods and results. *Regional Economy*. (2), 26–38. Retrieved from https://re.gov.ua/re202502/re202502_026_KiptachFYa.pdf
6. State Statistics Service of Ukraine. Official statistical data. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/
7. Bazilian M., Rogner H., Howells M., Hermann S., Arent D., Gielen D., Steduto P., Mueller A., Komor P., Tol R. S. J., Yumkella K. K. (2011). Considering the energy, water and food nexus: towards an integrated modelling approach. *Energy Policy*.*39*, 7896–7906. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.039
8. Lund H., Østergaard P. A., Connolly D., Mathiesen B. V. (2017). Smart energy and smart energy systems. *Energy*. *137*, 556–565. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.123
9. Ramos H. M., Giralt L., López-Jiménez P. A., Pérez-Sánchez M. (2023). Water-energy nexus management strategy towards sustainable mobility goal in smart cities. *Urban Water Journal*. *20*(10). 1406–1417. https://doi.org/10.1080/1573062X.2021.1973041
10. Alegre H., Baptista J. M., Cabrera E., Cubillo F., Duarte P., Hirner W., Merkel W., Parena R. Performance indicators for water supply services. 3rd ed. London: IWA Publishing, 2016. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/221936068_Performance_Indicators_for_Water_Supply_Services
11. Connolly D., Lund H., Mathiesen B. V. (2016). Smart energy Europe: the technical and economic impact of one potential 100 % renewable energy scenario for the European Union. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. *60*, 1634–1653. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.02.025
12. Kazmierczak A., Carter J. (2010). Adaptation to climate change using green and blue infrastructure: a database of case studies. Manchester: University of Manchester. Retrieved from https://www.grabs-eu.org/membersArea/files/databaseFinalReport.pdf
13. Kabisch N., Korn H., Stadler J., Bonn A. (Eds.). (2017). Nature-based solutions to climate change adaptation in urban areas. Cham: *Springer*, https://doi.org/10.1007/978-3-319-56091-5
14. Chen H., Zhang Y., Liu Z., Wang X., Li J. (2025). Assessing environmental, social, and governance risks in the water–energy–land–food nexus. *Land*, *14*(4), 669. https://doi.org/10.3390/land14040669
15. Global Reporting Initiative. (2018). GRI 303: Water and effluents 2018; GRI 302: Energy 2016. Amsterdam: Global Reporting Initiative, Retrieved from: https://www.globalreporting.org/standards/
16. DPSIR framework for state of the environment reporting. (2022). European Environment Agency. Copenhagen: EEA, Retrieved from https://www.eea.europa.eu/publications/92-9167-059-6-sum

The article was received by the editors 03.04.2026 The article was revised 05.05.2026
The article is recommended for printing 07.05.2026 This article published 30.05.2026

https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-10
УДК (UDC): 504.53.054:623.4(477)

А. Б. АЧАСОВ[1], д-р с.-г. наук, проф.,
завідувач кафедри екології та менеджменту довкілля
e-mail: achasov@karazin.ua ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-5009-7184

О. М. НЕМОШКАЛОВ[1],
аспірант кафедри екології та менеджменту довкілля
e-mail: alnemo7024@gmail.com ORCID ID: http://orcid.org/0009-0005-8275-7553

[1]*Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна*
майдан Свободи, 4, 61022, Харків, Україна

ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ МІЛІТАРНИХ АГРОЛАНДШАФТІВ

Мета. Апробація методологічних підходів до екологічного аудиту потенційно забруднених ґрунтів агроландшафтів, що зазнали впливу бойових дій.

Методи. Польові, аналітичні, дешифрування космічних знімків для ідентифікації вирв, метод атомно-абсорбційної спектрофотометрії.

Результати. Дослідження еколого-геохімічного стану ґрунтів агроландшафтів, що зазнали впливу бойових дій, проводили у 2025 році на базі дослідного полігону в Роганській територіальній громаді Харківської області. На підставі аналізу публікацій щодо мілітарного забруднення ґрунтів обґрунтовано застосування ГІС та дистанційного зондування для виявлення зон бомботурбації. Поєднано дешифрування космічних знімків із польовим відбором проб і визначенням рухомих форм Cd, Cr, Cu, Pb. Встановлено перевищення фонового вмісту без перевищення ГДК. Розроблено карту зонування агроландшафтів Роганської громади.

Висновки. Запропоноване зонування агроландшафтів за щільністю бомботурбації для оцінки потенційного забруднення як модель слугує основою для розробки ландшафтно-трансферних функцій та екстраполяції даних на інші деокуповані території.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *мілітарний агроландшафт, забруднення ґрунту, важкі металі, бомботурбація, вирви, дистанційне зондування, ГІС-технології*

Як цитувати: Ачасов А. Б., Немошкалов О. М. Забруднення ґрунтів мілітарних агроландшафтів. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2026. Вип. 34. С. 136-147. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-10

In cites: Achasov, A. B., & Nemoshkalov, O. M. (2026). Soil contamination of military agrolandscapes. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology,* (34), 136-147. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-10 (in Ukrainian)

Вступ

Збройна агресія Російської федерації проти України спричинила безпрецедентний за масштабами та інтенсивністю вплив на довкілля, де одним із найбільш вразливих компонентів виявився ґрунтовий покрив [1, 2]. Станом на сьогодні біля 21 мільйонів гектарів українських земель перебувають під впливом активних бойових дій, що призводить до їхньої тривалої та широкомасштабної деградації [3]. Особливої гостроти проблема набуває через те, що воєнні операції відбуваються переважно в межах «чорноземного поясу» – зони найродючіших ґрунтів світу, що забезпечують продовольчу безпеку для понад 400 мільйонів людей на планеті [4, 5, 6].

Актуальність вивчення забруднення мілітарних агроландшафтів обумовлена тим, що військова діяльність виступає потужним комплексним стресовим фактором в першу чергу для головного компонента агроландшафту – ґрунту.

© Ачасов А. Б., Немошкалов О. М., 2026

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0

Бойові дії спричиняють механічне руйнування ґрунту (бомботурбація, фортифікаційні роботи), зміну його фізичних характеристик (переущільнення технікою) та хімічне забруднення [7, 8, 9].

Детонація боєприпасів вивільняє спектр потенційно токсичних елементів, насамперед важких металів (Pb, Cd, Hg, Cu, Zn, Ni), які не піддаються біологічному розкладанню, накопичуються в ґрунті та мігрують у трофічні ланцюги «рослина - тварина - людина» [2, 3, 10, 11, 12].

Важливим є часовий чинник, адже природне очищення ґрунту від важких металів залежно від умов може тривати від сотень до тисяч років [10, 13, 14].

Зазначимо також, що руйнування агроландшафтів і втрата екосистемних послуг ґрунтів ставлять під загрозу досягнення Цілей сталого розвитку ООН, провокуючи посилення ерозійних процесів та забруднення підземних вод [4, 7, 16].

Незважаючи на інтенсивність бойових дій, моніторинг пошкоджених земель залишається фрагментарним через мінну небезпеку та обмежений доступ до територій [6, 10]. Це зумовлює нагальну потребу у впровадженні інноваційних методів дистанційного зондування та ГІС-технологій для оперативної оцінки шкоди, прогнозування міграції токсикантів та розробки стратегій екологічної ремедіації [4, 6, 16].

Дослідження еколого-геохімічного стану ґрунтів активних белігеріальних ландшафтів є не лише науковим завданням, а й критичною передумовою для повоєнного відновлення аграрного сектору, збереження здоров'я нації та забезпечення міжнародної екологічної безпеки [8,10, 17].

Матеріали та методи дослідження

Аналіз сучасних наукових публікацій свідчить, що масштаби забруднення ґрунтів в Україні мають переважно локалізований, проте гострий характер, особливо в районах активних бойових дій. Дослідження охоплюють різні природно-кліматичні зони з відмінним техногенним навантаженням, що зумовлює варіативність рівнів забруднення (табл. 1).

Так, у Бучанському районі Київської області зафіксовано підвищення вмісту рухомих форм важких металів у 3–9 разів порівняно з фоном [2]. У Сумській області вміст свинцю на забруднених ділянках перевищував фоновий рівень у 5,4 раза, а цинку - у 3,9 раза [3]. В Охтирському районі зафіксовано перевищення ГДК цинку до 51 раза [12].

На місцях ракетних ударів у Львові індекс забруднення Немерова (Ps) перевищив допустиме значення у 15 разів, причому найвищий екологічний ризик створює кадмій [18]. Концентрація свинцю тут у 10 разів перевищувала ГДК [19].

У південній частині країна найвищі рівні забруднення свинцем зафіксовано в Запорізькій області - у 11,17 раза понад ГДК [20]. У Дніпропетровській області концентрація свинцю сягає 3,9 ГДК, а нікелю - 1,8 ГДК [1].

Таблиця 1

Мілітарне забруднення ґрунтів важкими металами по регіонах України

Table 1

Military soil contamination with heavy metals by regions of Ukraine

Локалізація	Елемент	Рівень
Запорізька область	Pb	11,17 ГДК [20]
м. Львів	Pb	10,0 ГДК [19]
Миколаївська область	Pb	5,0 ГДК [20]
Дніпропетровська область	Pb	3,9 ГДК [1]
Сумська область	Zn	51,0 ГДК [12]
Київська область	Cr	1,26 ГДК [2]
Донецька область, Сартанська громада	Cd	7,6 ГДК [9]
Донецька область, м. Слов'янськ	Ti	150 разів понад фону [13]

Узагальнення наведених даних дозволяє констатувати, що домінуючими забруднювачами є свинець, кадмій та цинк, а найбільш високі рівні перевищення нормативів зафіксовано в регіонах інтенсивних бойових дій. Просторовий розподіл забруднення має осередко-

вий характер, що пов'язано з локалізацією вибухів, горінням військової техніки та руйнуванням інфраструктури.

Разом із тим сучасний стан вивчення мілітарного забруднення ґрунтів в Україні характеризується фрагментарністю. Це зумовлено об'єктивними чинниками: триваючими бойовими діями, мінною небезпекою та обмеженими ресурсами для проведення суцільного лабораторного контролю. Більшість досліджень фокусуються на фіксації «свіжих» слідів воєнного впливу, тобто на визначенні концентрацій токсикантів безпосередньо після вибухів або пожеж

Суттєвою науковою прогалиною залишається відсутність комплексних досліджень, що відображають стан ґрунтового покриву значних територій (окремих полів, фермерських господарств або громад) через певний час після завершення активної фази бойових дій. Сільськогосподарський обробіток ґрунту призводить до перерозподілу зон забруднення, що утворилися навколо вирв, по всій площі поля. Це створює ефект «розмивання» екстремальних концентрацій, але водночас збільшує загальну площу забруднених угідь, де продукція може накопичувати токсиканти у кількостях, що перевищують санітарні норми.

У цьому контексті особливий науковий інтерес становить Харківська область як один із найбільш постраждалих регіонів України. Значна частина її території зазнала активних бойових дій у 2022 році. Зафіксовано понад 420 615 мілітарних кратерів [6], що свідчить про потенційно масштабний характер техногенного навантаження на ґрунтовий покрив. Деокупація більшості територій створила передумови для проведення польових і лабораторних досліджень, що відобразилося у зростанні кількості наукових публікацій (табл. 2).

Таблиця 2

Аналіз забруднення ґрунтів Харківської області важкими металами

Table 2

Analysis of Kharkiv region soil contamination with heavy metals

Локація / Тип об'єкта	Елемент	Рівень забруднення
с. Мала Рогань (Гелікоптер)	Cd	Перевищення ГДК у 38,6 раза [6]
с. Рогань (Танк Т-72БЗ)	Cu	Перевищення ГДК у 62,39 раза [4]
Богодухівський р-н (Танк Т-80)	Pb	Перевищення ГДК у 78,8 раза [4]
Вільхівська громада (Поля)	Cd	Перевищення ГДК у 5,6 раза [9]
с. Федорівка (Кратер 122 мм)	Pb	Вміст 1,9 раза понад фоновий рівень [6]
Оскільська громада (Кратери)	Zn, Sr	Найвищі концентрації в кратерах авіабомб [6]

Аналіз літератури показує, що найвищі рівні забруднення зафіксовано на місцях горіння бронетехніки, падіння літальних апаратів або ж у мілітарних вирвах [4]. Так, на місці падіння гелікоптера у с. Мала Рогань (Роганська територіальна громада) концентрація кадмію перевищила ГДК у 38,6 раза, а міді - у 8,8 раза понад фон [6].

У Вільхівської громаді у локаціях бомбтурбації зафіксовано, що вміст кадмію перевищив ГДК у 5,6–8,5 раза, міді - до 6,4 раза [9]. У Богодухівському районі під уламками танка Т-80 зафіксовано екстремальне перевищення ГДК свинцю - у 78,8 раза [7].

Таким чином, результати наявних досліджень свідчать про значні рівні локального мілітарного забруднення ґрунтів важкими металами в різних регіонах України, зокрема в Харківській області. Встановлено істотні перевищення нормативних показників у місцях вибухів, горіння військової техніки та падіння літальних апаратів. Водночас дослідження мають переважно фрагментарний і точковий характер, що не дозволяє повною мірою оцінити масштаби просторового перерозподілу токсикантів та їх довгостроковий вплив на агроландшафти.

Метою роботи є апробація методологічних підходів до екологічного аудиту потенційно забруднених ґрунтів агроландшафтів, що зазнали впливу бойових дій.

Дослідження проводили у 2025 році на базі дослідного полігону в Роганській територіальній громаді Харківської області. Методологія базувалася на поєднанні дистанційного дешифрування космічних знімків для ідентифікації вирв та наземного обстеження ґрунтів полігону. У ході попередніх

досліджень на території полігону було зафіксовано 92 проява бомботурбації, що обумовило щільність вирв 1,63 од/га.

Відібрано 12 ґрунтових проб за регулярною сіткою (шар 0–20 см) та одну фонову пробу для визначення природного гео

хімічного фону. Аналітичні дослідження включали визначення вмісту рухомих форм Cd, Cu, Cr та Pb в амонійно-ацетатній витяжці (pH 4,8) методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії згідно з ДСТУ 4770.1-9:2007 [25].

Результати дослідження та обговорення

Дослідження проведене у 2025 році на території Роганської територіальної громади (РТГ), яка розташована в Харківському районі Харківської області (рис. 1). Громада займає площу 77,07 км², а її населення станом на 2016 рік становило понад 16 тисяч осіб [21]. Адміністративним осередком є смт Рогань.

Природні умови території характеризуються рівнинним рельєфом та домінуванням чорноземів звичайних легкосуглинкових на лесових породах. Гідрографічна мережа представлена річкою Роганка (басейн Сіверського Дінця). Рослинний покрив формують переважно листяні ліси з вкрапленнями хвойних порід, а також розгалужена система полезахисних смуг.

Оскільки 65% території громади складають сільськогосподарські угіддя, аграрний сектор є базовим для економіки РТГ. За таких умов моніторинг пошкоджень земель, спричинених бойовими діями, є фундаментальним фактором для подальшої стабілізації та розвитку регіону.

Об’єктом дослідження обрано сільськогосподарське поле, яке надалі визначено як «дослідний полігон» (рис. 1).

Згідно карті агровиробничих груп ґрунтів, що надана USAID АГРО у рамках співпраці з Харківським національним університетом імені В.Н. Каразіна вся територія дослідного полігону представлена одним ґрунтом – чорнозем типовий важкосуглинковий середньогумусний (шифр 54е).

Відмітимо, що ці ґрунти відносяться до особливо цінних груп ґрунтів загальнодержавного значення [22].

Ключовим завданням робіт визначено вивчення мілітарного забруднення ґрунтів важкими металами. При виборі місць відбору проб враховувалася інтенсивність бойових дій, що тривали на даній території у 2022 році [16]. Показником антропогенного впливу на дослідному полігоні слугувала щільність вирв, що утворилися внаслідок влучань боєприпасів (рис. 2) [23].

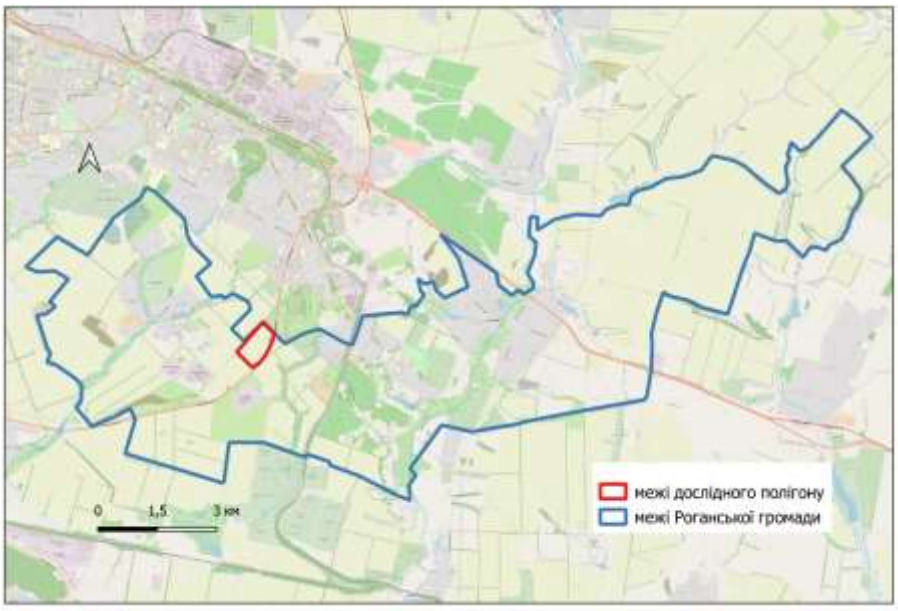


Рис.1 – Місце розташування дослідного полігону

Fig. 1 – Location of the test site

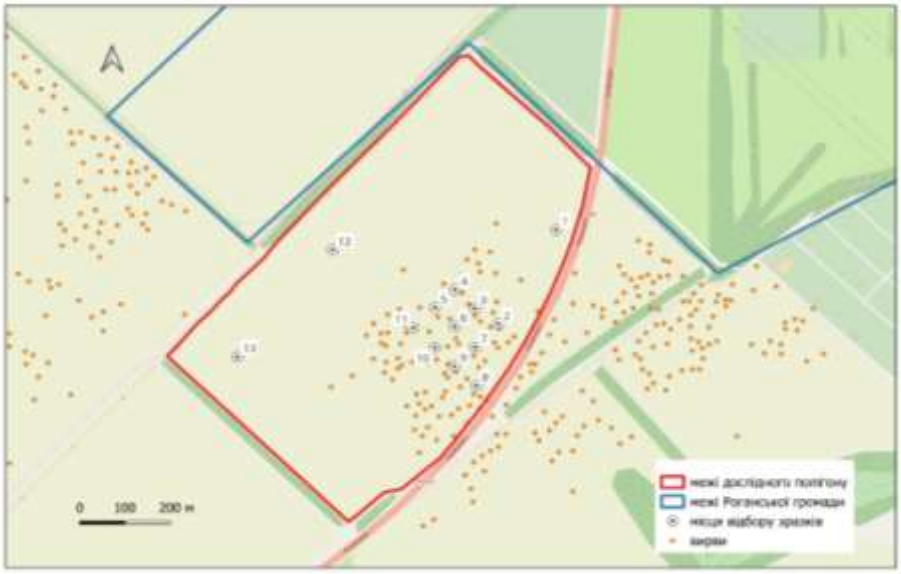


Рис.2 – Місце розташування дослідного полігону

Fig. 2 – Location of the test site

У червні 2025 року на полігоні було відібрано 12 ґрунтових проб з верхнього горизонту (0–20 см). Відбір здійснювався за регулярною сіткою з кроком 50 м (рис. 2). Процедура відбору відповідала вимогам ДСТУ 4287:2004 «Якість ґрунту. Відбирання проб» [24]. Для формування об'єднаної проби застосовувався метод «конверта», відбір проводився за допомогою пластикової лопатки для запобігання вторинному забрудненню.

Для порівняльного аналізу у вересні 2025 року було відібрано фонову пробу (точка № 22) на ділянці, де не зафіксовано наслідків бойових дій (рис. 3). Дана точка розташована на значній відстані від потенційних джерел забруднення важкими металами, зокрема від Кільцевої дороги, яка є джерелом постійного техногенного впливу через інтенсивний рух автотранспорту. Це програмне забезпечення з відкритим вихідним ко-



Рис. 3 - Місце відбору фонової проби (т.№ 22)

Fig. 3 - Location of background sample collection (item No. 22)

дом функціонує на основі архітектури настільної геоінформаційної системи QGIS, що забезпечує повну сумісність польових і камеральних етапів роботи. Застосування зазначеного інструментарію дозволило реалізувати безперервний цикл обробки геоданих шляхом прямої інтеграції попередньо налаштованого проєкту в польові умови.

У відібраних зразках визначали вміст кадмію (Cd), міді (Cu), хрому (Cr) та свинцю (Pb). Аналітичні дослідження проводили на базі Лабораторії інструментальних методів досліджень ґрунтів Національного наукового центру «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського». Аналіз виконували відповідно до вимог ДСТУ 4770.1–9:2007 [25]. Визначали вміст рухомих форм металів у буферній амонійно-ацетатній витяжці з pH 4,8 методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії.

Упродовж 2022–2023 років проведено дешифрування наслідків бойових дій у Харківському районі Харківської області на основі матеріалів дистанційного зондування Землі [16]. За результатами роботи сформовано геоінформаційну базу даних вирв, утворених унаслідок детонації боєприпасів. Загалом у межах досліджуваної території ідентифіковано 15 588 місць влучань. На основі проведеного геоінформаційного аналізу розроблено серію картографічних матеріалів, що відображають щільність влучань як на рівні адміністративного району в цілому, так і в розрізі окремих територіальних громад [16, 23]. Отримані карти не лише візуалізують інтенсивність бомботурбації, а й слугують аналітичною основою для оцінки потенційного рівня забруднення ґрунтів важкими металами. Припускається, що зростання кількості вирв на одиницю площі корелює з підвищенням ризику техногенного забруднення території.

Концепція дослідження передбачає виділення тестових полігонів із різною інтенсивністю бомботурбації для проведення детальних просторових обстежень. У межах польових робіт здійснюють відбір ґрунтових проб з подальшим лабораторним визначенням вмісту важких металів. Отримані результати стануть основою для розроблення ландшафтно-трансферної функції, що забезпечить можливість екстраполяції встановлених рівнів забруднення на інші території зі схожими показниками інтенсивності бомботурбації.

Оцінка забруднення ґрунтів проводилася на прикладі полігону площею 53 га (рис. 1). Встановлено, що досліджуваний агроландшафт зазнав значного мілітарного впливу. За результатами дешифрування космічних знімків встановлено локалізацію вирв (рис. 2). Аналіз просторового розподілу свідчить, що основний вплив зосереджений у центральній частині поля площею 11,3 га, де зафіксовано 92 влучання [23]. Таким чином, щільність вирв на цій ділянці становить 8,14 од./га. Щільність вирв для всього поля становить 1,63 од./га.

Відбір проб проводився за такою логікою: 9 точок розташовувались за регулярною мережею в потенційно забрудненій зоні (рис. 2). Точка №1 розташована за межами зони влучань на відстані 40 м від кільцевої автодороги з інтенсивним трафіком. Це дозволяє оцінити рівень забруднення, спричинений викидами автотранспорту. Точка №8 розміщена за аналогічних умов (40 м від дороги), проте в межах ділянки, що зазнала обстрілів. Порівняння цих точок дає змогу розмежувати вплив транспортного та воєнного чинників.

Точка №12 обрана на умовно чистій ділянці полігону, віддаленій від основних джерел антропогенного впливу. Точка №22 (фонова) закладена на суміжному полі, яке не зазнало мілітарного впливу, для визначення природного геохімічного фону.

Слід зауважити, що локалізація точок відбору не прив’язувалася до центрів окремих кратерів. Метою було визначення площинного «розмитого» забруднення, яке формується внаслідок подальшого сільськогосподарського обробітку. Оскільки з 2022 року поле перебуває в інтенсивній експлуатації, перемішування верхнього шару ґрунту технікою сприяє розподілу забруднювачів по всій площі масиву.

У таблиці 3 представлено результати агрохімічного аналізу вмісту рухомих форм важких металів (Cd, Cr, Cu, Pb) у 12 точках відбору на дослідному полігоні та в одній фоновій точці. Порівняння проводилося з гранично допустимими концентраціями (ГДК) згідно з постановою № 1325 від 15.12.2021 [26]. Аналіз даних свідчить, що у жодній із відібраних проб на дослідному по-

Таблиця 2

Концентрації важких металі у ґрунтах полігону, мг/кг

Table 2

Heavy metal concentrations in landfill soils, mg/kg

№ проби	Коментар	Кадмій (Cd)	Хром (Cr)	Мідь (Cu)	Свинець (Pb)
1	Полігон (потенційно забруднена зона)	0,084	0,727	0,415	1,974
2	Полігон (потенційно забруднена зона)	0,01	0,688	0,161	1,228
3	Полігон (потенційно забруднена зона)	0,16	1,022	0,21	2,248
4	Полігон (потенційно забруднена зона)	0,005	0,835	0,161	0,5
5	Полігон (потенційно забруднена зона)	0,005	0,444	0,305	0,817
6	Полігон (потенційно забруднена зона)	0,01	0,816	0,072	0,525
7	Полігон (потенційно забруднена зона)	0,005	0,658	0,327	1,129
8	Полігон (потенційно забруднена зона)	0,01	0,994	0,182	0,768
9	Полігон (потенційно забруднена зона)	0,005	0,716	0,199	0,291
10	Полігон (потенційно забруднена зона)	0,02	0,555	0,474	0,992
11	Полігон (потенційно забруднена зона)	0,002	0,77	0,545	0,869
12	Полігон (умовно чиста зона)	0,034	0,714	0,656	2,542
22	Фонова проба	0,01	0,408	0,257	0,062
ГДК	Гранично допустима концентрація	0,7	6	3	6

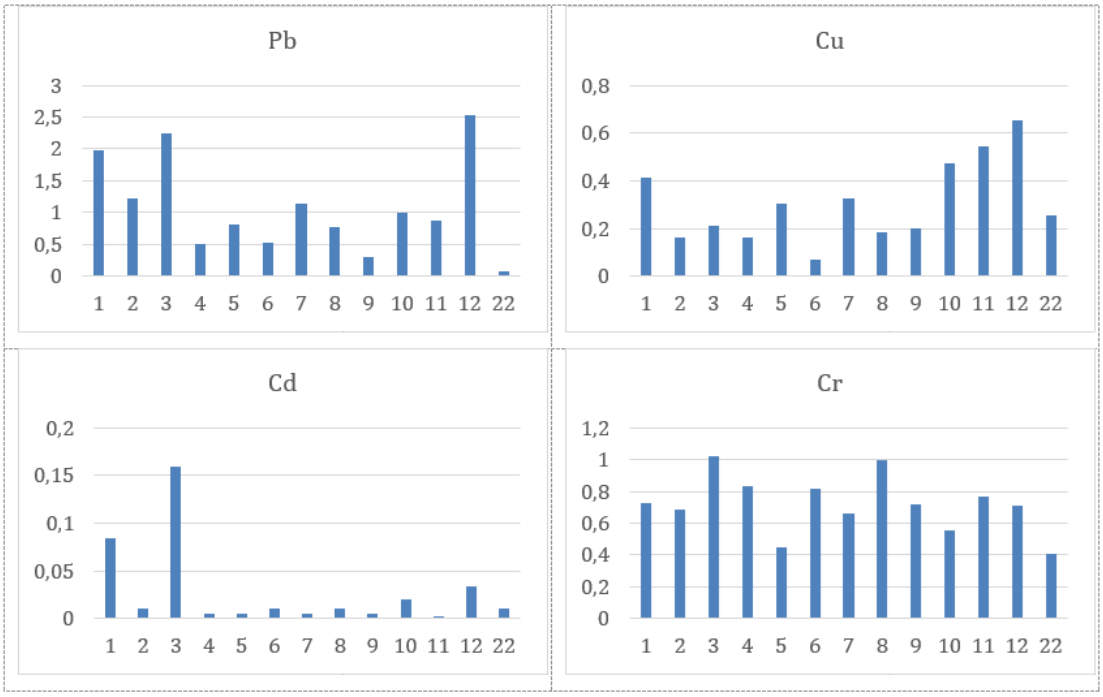


Рис.4 – Концентрації важких металі у ґрунтах полігону, мг/кг
Fig. 4 – Heavy metal concentrations in landfill soils, mg/kg

лігоні вміст досліджуваних важких металів не перевищує нормативів ГДК. Всі отримані значення є суттєво нижчими за граничні рівні.

Незважаючи на відповідність санітарним нормам, концентрації металів на полігоні (рис.4), включно з «умовно чистою» зоною (т.№12) помітно перевищують показники фонової точки № 22. Зокрема концентрації Pb на полігоні варіюють від 0,291 мг/кг до 2,542 мг/кг, тоді як фон становить лише 0,062 мг/кг. Уміст Cr на полігоні коливається від 0,444 мг/кг до 1,022 мг/кг при фоні 0,408 мг/кг. Такої

чіткої картини не складається для Cu та Cd, тут на полігоні присутні проби ґрунту з концентраціями, які менші за фон.

Але в цілому можна зробити висновок про наявність на полігоні підвищеного антропогенного навантаження. Детальний аналіз наведених даних буде проведений у наступному розділі.

Низькі показники концентрації забруднювачів на досліджуваному полігоні можуть бути обумовлені декількома чинниками. По-перше, специфіка проведеного аналізу передбачала визначення лише рухомих форм важких металів, тоді як значна частина елементів може залишатися у зв'язаному стані, не переходячи у витяжку.

По-друге, суттєвий вплив мають фактор часу та інтенсивність агротехнічних заходів: оскільки поле перебуває в активному обробітку з 2022 року, регулярні механічні операції призвели до інтенсивного перемішування верхнього шару ґрунту. Це спричинило так званий ефект «розбавлення», за якого локальні пікові концентрації речовин у місцях вибухів були рівномірно розподілені на значно більший об'єм ґрунтової маси, що зрештою нівелювало гостроту мілітарного впливу.

Можливі й інші пояснення. Зокрема точка № 12, яка вважалась умовно чистою несподівано показала максимальні значення по вмісту Pb = 2,542 мг/кг та Cu = 0,656 мг/кг. Це ставить під сумнів гіпотезу про те, що забруднення зосереджене виключно в зоні бомботурбації. Можливо, це наслідок нерівномірного внесення агрохімікатів у минулому або природної геохімічної аномалії.

Це підтверджує і той факт, що точки, розташовані в зоні найвищої щільності вирв (№№ 4, 5, 6), демонструють досить низькі рівні забруднення (Pb у межах 0,5–0,8 мг/кг). Винятком є точка № 3, де зафіксовано сплеск вмісту кадмію (0,160 мг/кг) та високий рівень свинцю (2,248 мг/кг). Це може вказувати на безпосередню близькість до епіцентру розриву специфічного типу боєприпасу.

Не підтвердилася гіпотеза про сумацію впливу «війна + дорога». Якщо точка №1 (тільки дорога) має високий вміст Pb (1,974 мг/кг), то точка №8 (дорога + війна) має значно нижчий вміст Pb (0,768 мг/кг). Це підтверджує домінування фактору механічного перемішування ґрунту над фактором локального накопичення.

Високі показники в умовно чистій зоні (точка 12) вимагають додаткового вивчення історії використання поля (добрива, склади палива в минулому тощо), оскільки мілітарний чинник не може бути єдиним поясненням такої варіабельності.

З огляду на те, що вміст рухомих форм токсикантів не перевищує ГДК, ризик транслокації важких металів у рослинну продукцію на даному полі можна оцінити як низький. Відповідно можна обережно прогнозувати,

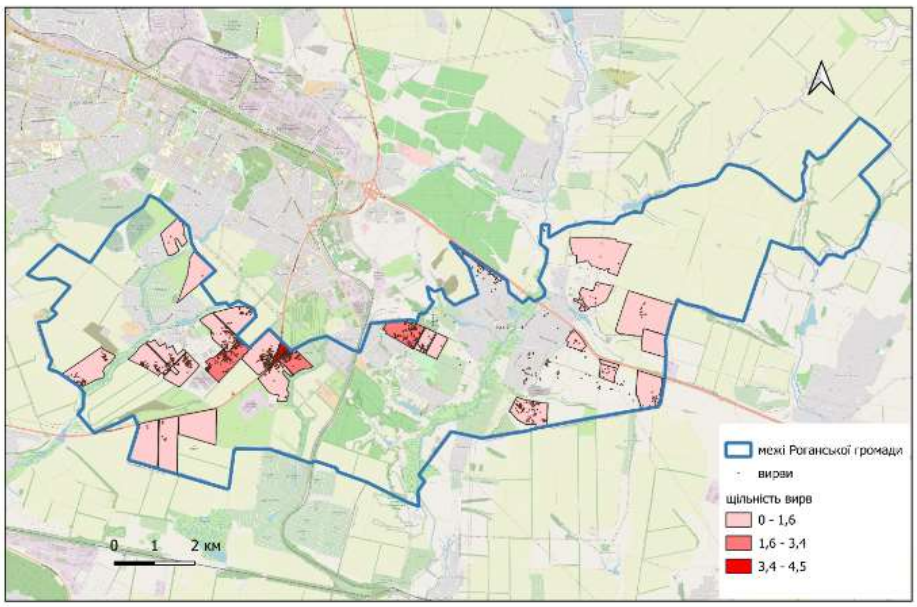


Рис. 5 – Зонування агроландшафтів Роганської громади за щільністю проявів бомботурбації

Fig. 5 – Zoning of the Rohansk community agrolandscapes by density of bomboturbation manifestations

що й інші агроландшафти з подібним рівнем мілітарного впливу матимуть схожій рівень забруднення.

На рис. 5 представлена карта зонування агроландшафтів Роганської громади за щільністю проявів бомботурбації. Виділені лише поля на яких зафіксовані наслідки вибухів. Усі вони розділені на 3 категорії відповідно до щільності вирв і, вірогідно, відповідно ступню потенційного хімічного забруднення. Спираючись на отримані дані можна вважати, що можливе значне забруднення ґрунтів важкими металами може спостерігатися лише на 4 полях громади, на яких щільність вирв більше 1,6 од/га.

Незважаючи на локальний характер, проведені дослідження формують методичне підґрунтя для системного моніторингу ґрунтів Харківського району. Сформована база геоданих уможливлює районування території за інтенсивністю обстрілів, що слугує основою для подальших польових обстежень на вміст важких металів у межах кожної виділеної зони.

Отримані результати сприятимуть розробці ландшафтно-трансферної функції для екстраполяції даних про рівні забруднення на території з подібними показниками бомботурбації.

Висновки

Результати аналізу рухомих форм важких металів (Cd, Cr, Cu, Pb) у ґрунтах дослідного полігону Роганської громади свідчать, що жодне зі значень не перевищує встановлених нормативів ГДК. Це дозволяє прогнозувати низький ризик негайного потрапляння токсикантів у сільськогосподарську продукцію на даній ділянці.

Незважаючи на відповідність ГДК, зафіксовано суттєве перевищення показників фонової точки. Особливо це стосується свинцю (Pb), концентрація якого на полігоні (до 2,542 мг/кг) у десятки разів вища за природний фон (0,062 мг/кг), та хрому (Cr), що підтверджує наявність антропогенного навантаження мілітарного походження.

Низькі концентрації металів у ґрунтах може бути пояснені інтенсивним сільськогосподарським обробітком поля, що триває з 2022 року. Регулярна оранка призвела до механічного перемішування верхнього шару ґрунту, внаслідок чого локальні пікові концентрації в епіцентрах вибухів були рівномірно розподілені по всій площі масиву.

На основі отриманих даних розроблено карту зонування агроландшафтів Роганської громади. Встановлено, що потенційне значне забруднення ґрунтів може спостерігатися лише на 4 полях громади, де щільність влучань перевищує 1,6 од./га. Ця модель слугує основою для розробки ландшафтно-трансферних функцій та екстраполяції даних на інші деокуповані території.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису немає. Автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Внесок авторів: автори зробили рівний внесок у цю роботу.

Декларація про використання ШІ

В роботі не використано ресурс штучного інтелекту.

Список використаної літератури

1. Yashchenko L., Androshchuk O., Vasylenko L., Chornoivan Y. Environmental risks of heavy metal pollution in war-affected soils in Ukraine. *European Journal of Environmental Sciences.* 2025. Vol. 15, no. 1. P. 18–27. https://doi.org/10.14712/23361964.2025.3
2. . Дмитренко О. В., Дем'янюк О. С., Погоріла Л. П. та ін. Екотоксикологічна оцінка дерново-підзолистого ґрунту за впливу бойових дій. *Агроекологічний журнал.* 2023. № 4. С. 89–96. URL: http://journalagroeco.org.ua/article/view/293758
3. Зайцев Ю. О., Грищенко О. М., Романова С. А., Зайцева І. О. Вплив бойових дій на вміст валових форм важких металів у ґрунтах Сумського та Охтирського районів Сумської області. *Агроекологічний журнал.* 2022. № 3. С. 136–149. https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2022.266419
4. .Solokha M., Melnyk O., Cannon N. et al. Assessment of soil cover chemical pollution using satellite data: A case study of Kharkiv region, Ukraine. *Science of the Total Environment.* 2025. Vol. 995. Art. 180105. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.180105

5. Novakovska I., Belousova N., Hunko L. Land degradation in Ukraine as a result of military operations. *Acta Scientiarum Polonorum. Administratio Locorum.* 2025. Vol. 24, no. 1. P. 129–145. https://doi.org/10.31648/aspal.9788
6. Bonchkovskyi O., Ostapenko P., Bonchkovskyi A., Shvaiko V. War-induced soil disturbances in north-eastern Ukraine (Kharkiv region): Physical disturbances, soil contamination and land use change. *Science of the Total Environment.* 2025. Vol. 964. Art. 178594. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178594
7. Solokha M. et al. Soil Degradation and Contamination Due to Armed Conflict in Ukraine. *Land*. 2024. Vol. 13, no. 10. Art. 1614. https://doi.org/10.3390/land13101614
8. Fedenko V. S. Transformation of vegetation under the conditions of the impact of military actions on the natural environment in Ukraine: A review. *Ecology and Noospherology.* 2023. Vol. 34, no. 2. P. 101–107. https://doi.org/10.15421/032315
9. Сплодитель А., Голубцов О., Чумаченко С., Сорокіна Л. Забруднення земель внаслідок агресії Росії проти України. Київ, 2023. 137 с. URL: https://ecoaction.org.ua/zabrudnennia-zemel-vnaslidok-rosii.html
10. Bezsonnyi V., Nekos A., Soldatenko M. et al. Assessment of iron and heavy metals accumulation in the soils of the combat zone. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 5, no. 10 (125). P. 50–59. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.289025
11. Lovynska V. et al. Monitoring Heavy Metals and Metalloids in Soils and Vegetation by Remote Sensing: A Review. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16, no. 17. Art. 3221. https://doi.org/10.3390/rs16173221
12. Лепікаш П. І. Нові підходи у дослідженні та прогнозуванні якості ґрунтів Хмельницької області внаслідок хімічного забруднення в умовах воєнного стану: кваліфікаційна робота магістра. Хмельницький, 2024. 81 с. URL: https://elar.khmnu.edu.ua/handle/123456789/17490
13. Чайка Т. О., Короткова І. В. Напрями та технології відтворення родючості ґрунтів в Україні в післявоєнний період. *Агробіологія.* 2023. № 1. С. 142–156. https://doi.org/10.33245/2310-9270-2023-1-142-156
14. Sytar O., Taran N. Effect of heavy metals on soil and crop pollution in Ukraine – a review. *Journal of Central European Agriculture.* 2022. Vol. 23, no. 4. P. 881–887. https://doi.org/10.5513/JCEA01/23.4.3603
15. Купінець Л. Є. Методичні підходи до розрахунку репарацій за шкоду, заподіяну продуктивним сільськогосподарським землям у результаті збройної агресії. *Ґрунтовий покрив України в умовах воєнних дій: стан, виклики, заходи з відновлення:* монографія / за ред. С. А. Балюка, А. В. Кучера, М. І. Ромащенка. Київ: Аграрна наука, 2024. Розд. 3. С. 97–131. https://doi.org/10.31073/978-966-540-612-9
16. Ачасов А. Б., Немошкалов О. М., Селіверстов О. Ю. Дистанційний моніторинг наслідків бойових дій на території Харківської області. *Ґрунтовий покрив України в умовах воєнних дій: стан, виклики, заходи з відновлення*: монографія / за ред. С. А. Балюка, А. В. Кучера, М. І. Ромащенка. Київ: Аграрна наука, 2024. Розд. 2. С. 97–131. https://doi.org/10.31073/978-966-540-612-9
17. Голубцов О., Сорокіна Л., Сплодитель А., Чумаченко С. Вплив війни Росії проти України на стан українських ґрунтів. Результати аналізу. Київ, 2023. 32 с. URL: https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/zabrudnennia-zemel-vid-rosii-summary.pdf
18. Petrushka K., Petrushka I., Yukhman Y. Assessment of the Impact of Military Actions on the Soil Cover at the Explosion Site by the Nemerov Method and the Pearson Coefficient: Case Study of the City of Lviv. *Journal of Ecological Engineering*. 2023. Vol. 24, no. 10. P. 77–85. https://doi.org/10.12911/22998993/170078
19. Petrushka K., Petrushka I., Holdrych A. Dynamics of heavy metals migration in the soil as a consequence of military actions. *Environmental Problems.* 2024. Vol. 9, no. 2. P. 109–115. https://doi.org/10.23939/ep2024.02.109
20. Bulba I., Drobitko A., Zadorozhnii Y., Pismennyi O. Identification and monitoring of agricultural land contaminated by military operations *Scientific Horizons*. 2024. Vol. 27, no. 7. P. 107–117. https://doi.org/10.48077/scihor7.2024.107
21. Роганська селищна військова адміністрація: офіційний сайт. URL: https://roganska-gromada.gov.ua/
22. Про затвердження переліку особливо цінних груп ґрунтів: наказ Держкомзему України від 06 жовт. 2003 р. № 245. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0996-03#Text
23. Ачасов А. Б., Селіверстов О. Ю., Дядін Д. В., Сєдов А. О. Дистанційний моніторинг наслідків бойових дій на території Харківської області. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія».* 2023. № 28. С. 71–82. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2023-28-06
24. Якість ґрунту. Відбирання проб: ДСТУ 4287:2004. Київ, 2005. 5 с. URL: https://environmentallab.com.ua/wp-content/uploads/2021/12/dstu-4287-2004-yakist-gruntu.-vidbirannya-prob.pdf
25. Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук марганцю (цинку, кадмію, заліза, кобальту, міді, нікелю, хрому, свинцю) в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з pH 4,8 методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії: ДСТУ 4770.1-9:2007. Київ, 2009. 117 с.URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=58849
26. Про затвердження нормативів гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин у ґрунтах, а також переліку таких речовин: постанова Кабінету Міністрів України від 15 груд. 2021 р. № 1325. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1325-2021-п#Text

Стаття надійшла до редакції 18.04.2026 Переглянуто 19.05.2026
Стаття рекомендована до друку 22.05.2026 Опубліковано 30.05.2026

A. B. ACHASOV[1], DSc (Agriculture), Prof.,
Head of the Department of Ecology and Environmental Management
e-mail: achasov@karazin.ua ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-5009-7184

O. M. NEMOSHKALOV[1],
PhD Student of the Department of Ecology and Environmental Management
e-mail: alnemo7024@gmail.com ORCID ID: http://orcid.org/0009-0005-8275-7553

[1]*V. N. Karazin Kharkiv National University,*
4, Svobody Square Kharkiv, 61022, Ukraine

SOIL CONTAMINATION OF MILITARY AGROLANDSCAPES

Purpose. Testing methodological approaches to the environmental audit of potentially contaminated soils of agricultural landscapes affected by hostilities.

Methods. Field, analytical, decoding of satellite images to identify craters, atomic absorption spectrophotometry method.

Results. Studies of the ecological and geochemical state of soils of agricultural landscapes affected by hostilities were conducted in 2025 on the basis of a research site in the Rohansk territorial community of the Kharkiv region. Based on the analysis of publications on military soil contamination, the use of GIS and remote sensing to identify bomb-turbation zones was justified. Deciphering of satellite images was combined with field sampling and determination of mobile forms of Cd, Cr, Cu, Pb. Exceedance of background content without exceeding the MPC was established. A zoning map of agricultural landscapes of the Rohansk community was developed.

Conclusions. The proposed zoning of agricultural landscapes by bomb-turbation density for assessing potential contamination serves as a model for developing landscape transfer functions and extrapolating data to other deoccupied territories.

KEYWORDS: *military agrolandscape, soil contamination, heavy metals, bomboturbation, craters, remote sensing, GIS technologies*

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest regarding the publication of this manuscript. Furthermore, the authors have fully adhered to ethical norms, including avoiding plagiarism, data falsification, and duplicate publication.

Authors Contribution: all authors have contributed equally to this work

AI Statement

The work does not use artificial intelligence resources.

References

1. Yashchenko, L., Androshchuk, O., Vasylenko, L., & Chornoivan, Y. (2025). Environmental risks of heavy metal pollution in war-affected soils in Ukraine. *European Journal of Environmental Sciences, 15*(1), 18–27. https://doi.org/10.14712/23361964.2025.3
2. Dmytrenko, O. V., Demianiuk, O. S., Pohorila, L. P., et al. (2023). Ecotoxicological assessment of sod-podzolic soil under the impact of military actions. *Agroecological journal*, (4), 89–96. http://journalagroeco.org.ua/article/view/293758
3. Zaitsev, Y. O., Hryshchenko, O. M., Romanova, S. A., & Zaitseva, I. O. (2022). Impact of military actions on the content of total forms of heavy metals in soils of Sumy and Okhtyrka districts, Sumy region. *Agroecological journal*, (3), 136–149. https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2022.266419
4. Solokha, M., Melnyk, O., Cannon, N., et al. (2025). Assessment of soil cover chemical pollution using satellite data: A case study of Kharkiv region, Ukraine. *Science of the Total Environment, 995*, Article 180105. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.180105
5. Novakovska, I., Belousova, N., & Hunko, L. (2025). Land degradation in Ukraine as a result of military operations. *Acta Scientiarum Polonorum. Administratio Locorum, 24*(1), 129–145. https://doi.org/10.31648/aspal.9788
6. Bonchkovskyi, O., Ostapenko, P., Bonchkovskyi, A., & Shvaiko, V. (2025). War-induced soil disturbances in north-eastern Ukraine (Kharkiv region): Physical disturbances, soil contamination and land use change. *Science of the Total Environment, 964*, Article 178594. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178594
7. Solokha, M., et al. (2024). Soil degradation and contamination due to armed conflict in Ukraine. *Land, 13*(10), Article 1614. https://doi.org/10.3390/land13101614

8. Fedenko, V. S. (2023). Transformation of vegetation under the conditions of the impact of military actions on the natural environment in Ukraine: A review. *Ecology and Noospherology*, *34*(2), 101–107. https://doi.org/10.15421/032315
9. Splodytel, A., Holubtsov, O., Chumachenko, S., & Sorokina, L. (2023). *Land contamination as a result of Russia's aggression against Ukraine*. Kyiv: NGO "Center for Environmental Initiatives 'Ecoaction'". Retrieved from https://ecoaction.org.ua/zabrudnennia-zemel-vnaslidok-rosii.html
10. Bezsonnyi, V., Nekos, A., Soldatenko, M., et al. (2023). Assessment of iron and heavy metals accumulation in the soils of the combat zone. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *5*(10(125)), 50–59. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.289025
11. Lovynska, V., et al. (2024). Monitoring heavy metals and metalloids in soils and vegetation by remote sensing: A review. *Remote Sensing*, *16*(17), Article 3221. https://doi.org/10.3390/rs16173221
12. Lepikash, P. I. (2024). *New approaches to the study and forecasting of soil quality in Khmelnytskyi region under chemical contamination in martial law conditions* (Master's thesis). Khmelnytskyi National University. Retrieved from https://elar.khmnu.edu.ua/handle/123456789/17490
13. Chaika, T. O., & Korotkova, I. V. (2023). Directions and technologies for restoring soil fertility in Ukraine in the post-war period. *Ahrobiolohiia*, (1), 142–156. https://doi.org/10.33245/2310-9270-2023-1-142-156
14. Sytar, O., & Taran, N. (2022). Effect of heavy metals on soil and crop pollution in Ukraine – A review. *Journal of Central European Agriculture*, *23*(4), 881–887. https://doi.org/10.5513/JCEA01/23.4.3603
15. Kupinets, L. Ye. (2024). Methodological approaches to calculating reparations for damage caused to productive agricultural lands as a result of armed aggression. In S. A. Baliuk, A. V. Kucher, & M. I. Romashchenko (Eds.), *Soil cover of Ukraine under military actions: Status, challenges, and restoration measures* (Chap. 3, pp. 97–131). Kyiv: Ahrarna Nauka. https://doi.org/10.31073/978-966-540-612-9
16. Achasov, A. B., Nemoshkalov, O. M., & Seliverstov, O. Yu. (2024). Remote monitoring of the consequences of hostilities in Kharkiv region. In S. A. Baliuk, A. V. Kucher, & M. I. Romashchenko (Eds.), *Soil cover of Ukraine under military actions: Status, challenges, and restoration measures* (Chap. 2, pp. 97–131). Kyiv: Ahrarna Nauka. https://doi.org/10.31073/978-966-540-612-9
17. Holubtsov, O., Sorokina, L., Splodytel, A., & Chumachenko, S. (2023). *Impact of Russia's war against Ukraine on the condition of Ukrainian soils: Results of analysis*. Kyiv: NGO "Center for Environmental Initiatives 'Ecoaction'". Retrieved from https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/zabrudnennia-zemel-vid-rosii-summary.pdf
18. Petrushka, K., Petrushka, I., & Yukhman, Y. (2023). Assessment of the impact of military actions on the soil cover at the explosion site by the Nemerov method and the Pearson coefficient: Case study of the city of Lviv. *Journal of Ecological Engineering*, *24*(10), 77–85. https://doi.org/10.12911/22998993/170078
19. Petrushka, K., Petrushka, I., & Holdrych, A. (2024). Dynamics of heavy metals migration in the soil as a consequence of military actions. *Environmental Problems*, *9*(2), 109–115. https://doi.org/10.23939/ep2024.02.109
20. Bulba, I., Drobitko, A., Zadorozhnii, Y., & Pismennyi, O. (2024). Identification and monitoring of agricultural land contaminated by military operations. *Scientific Horizons*, *27*(7), 107–117. https://doi.org/10.48077/scihor7.2024.107
21. Rohanska Settlement Military Administration. (2026). Official website. Retrieved from https://roganska-gromada.gov.ua/
22. State Committee for Land Resources of Ukraine. (2003, October 6). On approval of the list of especially valuable soil groups (Order No. 245). Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0996-03#Text
23. Achasov, A. B., Seliverstov, O. Yu., Diadin, D. V., & Siedov, A. O. (2023). Remote monitoring of the consequences of hostilities in Kharkiv region. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series "Ecology"*, (28), 71–82. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2023-28-06
24. State Standard of Ukraine. (2005). *Soil quality. Sampling (DSTU 4287:2004)*. Kyiv. Retrieved from https://environmentallab.com.ua/wp-content/uploads/2021/12/dstu-4287-2004-yakist-gruntu.-vidbirannya-prob.pdf
25. State Standard of Ukraine. (2009). *Soil quality. Determination of mobile compounds of manganese (zinc, cadmium, iron, cobalt, copper, nickel, chromium, lead) in soil in ammonium acetate buffer extract with pH 4.8 by atomic absorption spectrophotometry (DSTU 4770.1-9:2007)*. Kyiv. Retrieved from https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=58849
26. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2021, December 15). On approval of maximum permissible concentrations of hazardous substances in soils (Resolution No. 1325). Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1325-2021-п#Text

The article was received by the editors 18.04.2026 The article was revised 19.05.2026
The article is recommended for printing 22.05.2026 This article published 30.05.2026

ЗБАЛАНСОВАНЕ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-11
UDC 502.131.1:504.06:519.81

N. O. BRYNZA, PhD (Technics),
Associate Professor, Department of Computer Science and Computer Engineering
e-mail: Natalia.Brynza@hneu.net ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-0229-2874
Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics,
9a, Nauky Ave., Kharkiv, 61165, Ukraine

MULTI-CRITERION ASSESSMENT OF THE PRIORITY OF ENVIRONMENTAL PROTECTION MEASURES BASED ON OPEN ONLINE DATA

Purpose. To develop and test a methodology for multi-criteria assessment of environmental protection priorities using open online data under conditions of incomplete information and interval uncertainty.

Methods. Systems analysis, multi-criteria assessment, an additive utility function, expert weighting of criteria, normalization of heterogeneous indicators, interval analysis, and scenario analysis. Open online sources selected as the information basis: NASA FIRMS for active fires, JRC Global Surface Water for water dynamics, ESA WorldCover and Sentinel-2/Copernicus Data Space for land cover and vegetation indicators, OpenAQ for air quality, HDX for administrative boundaries, Global Forest Watch for tree cover loss, and EkoZagroza as an auxiliary source of environmental threat reports.

Results. The study addresses a practical problem in environmental management: how to justify priority actions when several measures are relevant simultaneously, and the available data have different spatial resolutions, reliability, and completeness. A pilot computational experiment conducted for a conditional urbanized area in the Kharkiv region. Six environmental alternatives assessed: greening, cleaning water bodies, reclamation of disturbed lands, strengthening air monitoring, improving waste management, and fire-prevention measures. Six criteria used: environmental effect, implementation cost, implementation time, social significance, risk of inaction, and availability of online data. The highest baseline utility scores obtained for waste management improvement, and fire-prevention measures. The following priorities water body cleaning, greening, strengthening of air monitoring, and reclamation of disturbed lands. Scenario analysis showed that the first two alternatives remain the highest-priority group under different weighting assumptions.

Conclusions. The proposed methodology enables formalizing preliminary environmental decision-making even when online data are incomplete. Interval representation does not eliminate uncertainty but makes it explicit and useful for assessing the reliability of ranking results. The method can support the preliminary justification of local environmental protection programs and should be further tested using actual datasets for specific territorial communities.

KEYWORDS: *environmental protection measures, multi-criteria assessment, environmental management. online data, interval uncertainty, utility function*

Як цитувати: Brynza N. O. Multi-criterion assessment of the priority of environmental protection measures based on open online data. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2026. Вип. 34. С.148-158. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-11

In cites: Brynza, N. O. (2026). Multi-criterion assessment of the priority of environmental protection measures based on open online data. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology,* (34), 148-158. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-11

Introduction

Environmental management at the local community and urban levels is increasingly carried out under conditions marked by a combination of constraints: insufficient financial resources, incomplete environmental monitoring, inconsistent open data, and uncertainty about the consequences of delaying management actions. For a single area, the following measures may all be relevant at the same time: landscaping, waterbody cleanup, reclamation of dis turbed land,

© Brynza N. O., 2026
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0

enhanced air-quality monitoring, improved waste management, and fire prevention measures. Under these conditions, the key scientific and practical task is not only to describe environmental problems but also to make an informed selection of priority environmental protection measures.

The complexity of such a choice stems from the multiple criteria involved. One environmental protection measure may have a significant ecological impact but require substantial costs and a long time to implement; another measure may be cheaper and faster but have only a local or indirect effect. Furthermore, the decision must consider social significance, the risk of inaction, and the reliability of the information base. Therefore, prioritizing measures falls into the category of multi-criteria decision-making under conditions of uncertainty.

The methodological foundation of this study is a systematic approach to decision-making, developed in works on multi-criteria optimization, utility theory, and uncertainty analysis [1–8]. In her dissertation, N. O. Brynza demonstrates the need to account for the complexity, multi-criteria nature, and interval uncertainty of the input data when selecting effective solutions [1]. This point is particularly important for environmental issues, since natural, social, and economic indicators differ in nature, units of measurement, and reliability.

Modern open online data creates new opportunities for preliminary environmental assessments. NASA FIRMS provides access to near-real-time MODIS and VIIRS data on active fires [19; 20]. RC Global Surface Water contains data on the spatiotemporal distribution of surface water for the period 1984–2021. [21; 22]. ESA WorldCover provides global land cover maps with a spatial resolution of 10 meters [23], a Copernicus Data Space provides open access to Sentinel data and data processing services [24]. OpenAQ provides open data on air quality and an API for accessing it [25]. HDX contains administrative boundaries of Ukraine [26], Global Forest Watch publishes data on deforestation [27], and EcoZagroza is the official resource for recording environmental threats, although its historical data and full functionality were in the process of being restored at the time of this study's preparation [28].

An analysis of recent studies confirms the widespread use of multi-criteria analysis in environmental management, water resource management, nature-based decision-making, and the assessment of ecosystem services [9–15]. At the same time, the issue of combining open online data, expert assessments, and interval uncertainty into a single applied procedure for ranking environmental protection measures remains underdeveloped. This article addresses this unresolved issue.

The aim of this study is to develop and test a methodology for the multi-criteria prioritization of environmental protection measures based on open online data, considering the interval uncertainty of the source information.

Methods

The object of this study is the process of preselecting priority environmental protection measures for an urbanized area under conditions of incomplete online information. The subject of this study is a methodology for multi-criteria ranking of environmental protection alternatives using a utility function, expert weighting coefficients, and interval data representation.

The pilot test was conducted as a computational experiment for a hypothetical urbanized area in the Kharkiv region. This format was chosen because the article's purpose is to verify the methodological suitability of the systematic procedure rather than to replace comprehensive field monitoring. The actual application of the methodology to a specific community requires loading spatial data into a GIS environment and aggregating indicators within administrative polygons.

The experimental conditions are as follows: six alternative environmental protection measures, six evaluation criteria, a scale of initial ratings [0; 10], interval representation of initial ratings, and four scenarios for weighting coefficients are considered. Laboratory equipment and reagents were not used, as the study is a digital computational experiment based on open-source data and expert-interval formalization.

The research logic is presented in Fig. 1. The main stages are: selection of online sources, development of indicators, conversion of indicators into an expert interval scale, normalization of criteria, calculation of the integral utility function, ranking of alternatives, and scenario analysis of the stability of results.

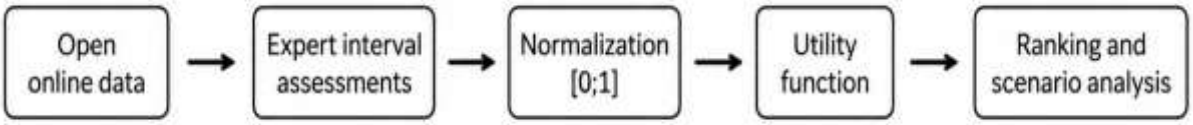


Fig. 1 – Logical scheme of the multi-criteria online research methodology

Table 1

Open online sources suitable for generating input data

Data block	Source	Specifications for the model
Administrative boundaries	HDX Ukraine Subnational Administrative Boundaries	Boundaries of communities/districts, area, spatial aggregation
Fire activity	NASA FIRMS MODIS/VIIRS	Number of fire points, FRP, fire density
Surface water	JRC Global Surface Water	Availability, seasonality, and changes in the water surface
Land cover	ESA WorldCover, Sentinel-2, Copernicus Data Space	Green areas, built-up areas, bare soil, NDVI
Air	OpenAQ API and local networks	Number of stations, PM2.5, PM10, days with data
Loss of forest cover	Global Forest Watch / GLAD	Loss of forest cover by year
Environmental threats	ЕкоЗагроза	Auxiliary layer of threat notifications

For the purposes of this study, six alternative environmental protection measures were identified (Table 2). These reflect typical areas of environmental protection in urbanized areas and can be tailored to address the community's specific environmental challenges.

The alternatives were evaluated based on six criteria (Table 3). Criteria C1, C4, C5, and C6 are positive factors; that is, increases in these criteria raise the measure's priority. Criteria C2 and C3 are negative factors, as higher costs and longer implementation periods lower the priority, all other things being equal.

Table 2

Environmental protection alternatives and online indicators

Code	Alternative	Online indicators
A1	Landscaping	NDVI, proportion of green spaces, loss of tree cover, population
A2	Water body cleanup	Water area, seasonality, loss/change in water surface area
A3	Remediation of Disturbed Lands	Proportion of bare soil, development, loss of tree cover
A4	Enhanced Air Quality Monitoring	Number of stations, days with data, PM2.5, PM10
A5	Improved Waste Management	Threat alerts, urbanization, population, local programs
A6	Fire Prevention Measures	Number of fires, FRP, fire density, green areas

Table 3

Evaluation criteria and baseline weights

Code	Criterion	Optimization objective	Weight
C1	Environmental impact	max	0.25
C2	Implementation cost	min	0.15
C3	Implementation timeline	min	0.1
C4	Social significance	max	0.2
C5	Risk of inaction	max	0.2
C6	Availability of online data	max	0.1

For incentive criteria, the normalized value was calculated using the formula:

$$x_{ij} = \frac{a_{ij} - a_i^{min}}{a_i^{max} - a_i^{min}}$$

Reverse normalisation was used for the disincentive criteria:

$$x_{ij} = \frac{a_i^{max} - a_{ij}}{a_i^{max} - a_i^{min}}$$

The overall priority rating of the jth measure was determined using an additive utility function:

$$U_j = \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot x_{ij}$$

where w_i – the weighting coefficient of the i-th criterion,

x_{ij} – the normalized value of the i-th criterion for the j-th alternative.

Under conditions of interval uncertainty, the following representation was used

$$\overline{U_j} = \left[U_j^-; U_j^+\right]$$

and for the basic ranking, the midpoint of the interval was calculated

$$\mathrm{U_{jc}} = \frac{(U_j^- + U_j^+)}{2}$$

Interval length $\Delta U = \mathrm{U_j} + - \mathrm{U_j} -$ was interpreted as an indicator of the uncertainty of the assessment.

Results

In the first stage, an initial expert-based interval matrix was developed for evaluating alternatives on a scale of [0; 10] (Table 4). The intervals reflect the incompleteness of online information, the varying levels of detail in open data, and the need for expert interpretation of spatial indicators. For example, NASA FIRMS data is given greater weight for fire prevention measures, JRC Global Surface Water for the clean-up of water bodies, and ESA WorldCover, Sentinel-2 and Global Forest Watch for greening and land restoration.

Table 4

Initial expert-interval assessment matrix [0; 10]

Code	Event	C1	C2	C3	C4	C5	C6
A1	Landscaping	[6; 8]	[4; 6]	[3; 5]	[7; 9]	[5; 7]	[7; 9]
A2	Water body treatment	[7; 9]	[6; 8]	[5; 7]	[6; 8]	[7; 9]	[6; 8]
A3	Rehabilitation of disturbed land	[6; 9]	[7; 9]	[6; 9]	[5; 7]	[6; 9]	[4; 6]
A4	Enhanced air quality monitoring	[5; 7]	[3; 5]	[2; 4]	[6; 8]	[5; 8]	[8; 10]
A5	Improved waste management	[7; 9]	[5; 7]	[4; 6]	[8; 10]	[7; 9]	[6; 8]
A6	Fire prevention measures	[6; 8]	[3; 5]	[2; 4]	[6; 8]	[8; 10]	[7; 9]

After normalization, all criteria were converted to a dimensionless scale [0; 1] (табл. 5). The normalized matrix allows for the comparison of indicators of different types: environmental, economic, social, and informational.

Calculation of the integrated utility function based on the weightings revealed that improving waste management and fire prevention measures are the highest priorities (Table 6). These alternatives combine a high risk of inaction, significant social importance, and relatively acceptable cost and implementation timeframe parameters.

The graphical representation of the utility intervals (Fig. 2) shows that the first two alternatives' intervals overlap slightly. This means that the difference between A5 and A6 is small, and the final decision may depend on the clarification of local data, financial conditions and the positions of the stakeholders.

To verify the robustness of the results, a scenario analysis was carried out using four sets of weighting coefficients: baseline, environmental, budgetary-temporal, and informational. The environmental scenario emphasizes the magnitude of environmental impact and the risk

Table 5

Normalized interval assessment matrix [0; 1]

Code	Event	C1	C2	C3	C4	C5	C6
A1	Landscaping	[0.250; 0.750]	[0.500; 0.833]	[0.571; 0.857]	[0.400; 0.800]	[0.000; 0.400]	[0.500; 0.833]
A2	Water body treatment	[0.500; 1.000]	[0.167; 0.500]	[0.286; 0.571]	[0.200; 0.600]	[0.400; 0.800]	[0.333; 0.667]
A3	Rehabilitation of disturbed land	[0.250; 1.000]	[0.000; 0.333]	[0.000; 0.429]	[0.000; 0.400]	[0.200; 0.800]	[0.000; 0.333]
A4	Enhanced air quality monitoring	[0.000; 0.500]	[0.667; 1.000]	[0.714; 1.000]	[0.200; 0.600]	[0.000; 0.600]	[0.667; 1.000]
A5	Improved waste management	[0.500; 1.000]	[0.333; 0.667]	[0.429; 0.714]	[0.600; 1.000]	[0.400; 0.800]	[0.333; 0.667]
A6	Fire prevention measures	[0.250; 0.750]	[0.667; 1.000]	[0.714; 1.000]	[0.200; 0.600]	[0.600; 1.000]	[0.500; 0.833]

Table 6

Integral priority scores of environmental protection measures

Code	Event	U_{min}	U_{max}	U_c	ΔU	Rank
A5	Improved waste management	0.451	0.848	0.650	0.397	1
A6	Fire prevention measures	0.444	0.841	0.642	0.397	2
A2	Water body treatment	0.332	0.729	0.530	0.397	3
A1	Landscaping	0.325	0.722	0.523	0.397	4
A4	Enhanced air quality monitoring	0.278	0.715	0.497	0.437	5
A3	Rehabilitation of disturbed land	0.102	0.616	0.359	0.514	6

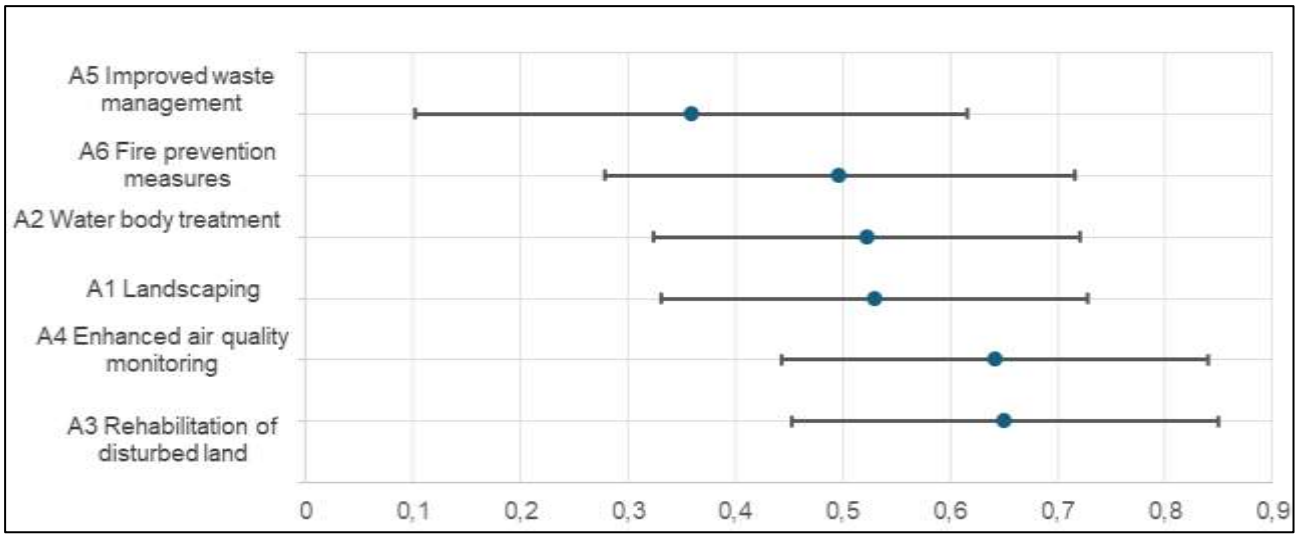


Fig. 2 – Interval priority scores of environmental protection measures

of inaction; the budgetary-temporal scenario emphasizes costs and the implementation time-frame; and the informational scenario emphasizes the availability of online data. The resulting rankings are shown in Table 7.

Under the baseline scenario (Fig/ 3), alternative A5 – improving waste management – came first (Uc = 0.650). Fire safety measures A6 came second (Uc = 0.642). The difference between them is only 0.007, indicating that both measures belong to the same highest-priority group.

The purification of water bodies (A2) was assigned a third rank (Uc = 0.530). Its high environmental significance is partly offset by higher costs and a longer implementation time-frame. Landscaping of the A1 area has a fourth rank (Uc = 0.523) due to its positive social impact, but a lower risk of inaction than A5 and A6.

Enhanced atmospheric air monitoring (A4) ranks fifth under the baseline scenario, although it rises to third place under the budget-time scenario. This reflects the nature of monitoring measures: they are relatively quick and inexpensive, but their direct environmental benefits are indirect. The rehabilitation of disturbed land (A3) has the lowest ranking in all scenarios, which is explained by its high cost, duration, and the widest range of uncertainty.

Table 7

Ranks of alternatives under weighting scenarios

Code	Event	Basic	Environmental	Budget and time	Information
A1	Landscaping	4	4	4	3
A2	Water body treatment	3	3	5	4
A3	Land restoration	6	6	6	6
A4	Enhanced air quality monitoring	5	5	3	5
A5	Improved waste management	1	1	2	1
A6	Fire prevention measures	2	2	1	2

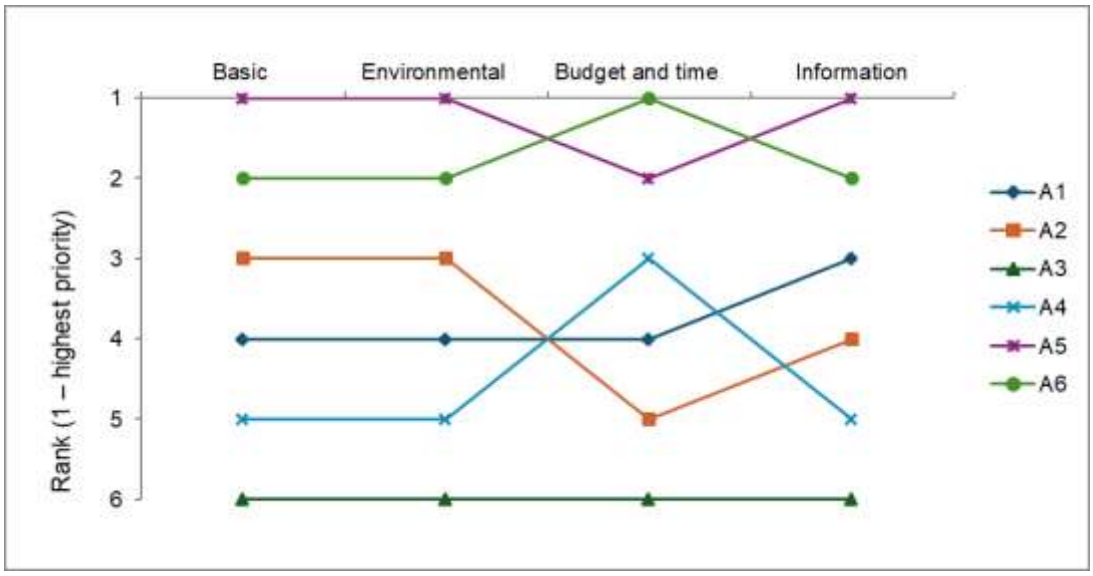


Fig. 3 – Change in alternative ranks under weighting scenarios

Thus, the computational experiment revealed three patterns: firstly, measures combining a high environmental impact with a high risk of inaction occupy the top of the ranking; secondly, low cost and short duration can significantly alter an alternative's position

in a budget-time scenario; thirdly, the width of the interval of the integrated assessment is an important indicator of the need for additional data.

Discussion

The results obtained are consistent with the current approach to multi-criteria environmental assessment, which holds that a management decision should take into account not just a single dominant indicator, but a system of environmental, economic, social, and informational criteria [9–15]. Works on MCDA emphasize that environmental problems are multidimensional, conflicting, and sensitive to weighting assumptions, and therefore require stability analysis and transparent justification of criteria [11, 12]. The scenario analysis conducted confirmed this thesis: when weighting coefficients are changed, the first two alternatives remain in the leading group, whilst the positions of A1, A2, and A4 are more sensitive.

A comparison with the literature on nature-based solutions shows that greening and the restoration of ecosystem functions generally have significant socio-environmental impacts, but their priority depends on local demand for ecosystem services, available land, costs, and expected co-benefits [13–18]. In this study, greening received a medium ranking, which does not negate its importance but reflects a methodological distinction between its strategic value and its priority under conditions of limited resources.

Waste management ranked first because it offers environmental, public health, and social benefits. In practice, its assessment requires further clarification based on local programs, open budgets, public procurement data, and reports of unauthorized waste dumps. At the same time, this area is often well understood by the local population, which enhances its social significance.

Fire prevention measures ranked second and remained in the highest-priority group across all scenarios. This is because fires can rapidly lead to a deterioration in air quality, loss of vegetation cover, soil degradation, and secondary environmental risks. The availability of NASA FIRMS open data makes this area particularly suitable for online research and operational environmental management [19; 20].

The scientific novelty of this work lies in adapting a multi-criteria decision-making methodology under interval uncertainty to the task of selecting environmental protection measures based on open online data. Unlike conventional expert ranking, the proposed approach provides a formal structure of criteria, transparent weighting assumptions, the calculation of interval utility values, and verification of the robustness of the results.

The practical value of the methodology lies in its use as a preliminary tool for developing community environmental protection programs. The results do not replace field monitoring, but they do help us determine which alternatives should have priority for additional data collection. The widest range of uncertainty was found for the reclamation of disturbed land, indicating the need for a spatial inventory of degraded sites, an assessment of soil contamination, and a technical and economic justification..

Conclusions

A methodology is proposed for the multi-criteria prioritization of environmental protection measures based on open online data. The methodology combines systematic analysis, expert-based interval formalization, criterion normalization, an additive utility function, and scenario analysis of weighting coefficients.

The study's information base has been established, comprising NASA FIRMS, JRC Global Surface Water, ESA WorldCover, Copernicus Data Space, OpenAQ, HDX, Global Forest Watch and EcoZagroza. These sources enable the development of indicators to assess fire activity, the state of surface waters, green areas, land cover, atmospheric air quality, administrative boundaries, and environmental threats.

According to the results of the pilot computational experiment, waste management improvements and fire safety measures were given the highest priority. Their integral scores, based on the midpoint of the interval, were 0.650 and 0.642, respectively, indicating that these alternatives are closely matched and that further local data refinement is required before a final management decision can be made.

It has been established that the clean-up of water bodies and the greening of the area form the middle priority group, whilst enhanced air

monitoring is particularly sensitive to the budget and time constraints. The restoration of disturbed land has the lowest short-term priority and the greatest uncertainty, explained by its high cost, long duration, and the lack of detailed online data.

A cause-and-effect analysis shows that the priority of an environmental protection measure is determined not only by its environmental impact, but by a combination of environmental effectiveness, the risk of inaction, social significance, cost, implementation timeframe, and the availability of information. The answer to the question posed in the introduction is affirmative: even with incomplete online information, it is possible to obtain a well-founded preliminary ranking of environmental protection measures by using a multi-criteria model with interval data representation.

Further research should focus on testing the methodology within specific local communities in the Kharkiv region, involving the automated aggregation of indicators within a GIS and the comparison of online assessment results with field environmental monitoring data.

Conflict of Interest

The author declares no conflict of interest regarding the publication of this manuscript. Furthermore, the author has fully adhered to ethical norms, including avoiding plagiarism, data falsification, and duplicate publication.

AI Statement

During the preparation of this manuscript, artificial intelligence ChatGPT-5.5 (OpenAI, 2026) used for organizational support, text structuring, language editing, and performing auxiliary calculations. No synthetic field data were used. The author bears full responsibility for the content, the accuracy of the data, the interpretation of the results, and the conclusions.

Reference

1. Brynza, N. O. (2013). Methods and mathematical models of multi-criteria decision-making under heterogeneous interval uncertainty [Candidate dissertation, Kharkiv National University of Radio Electronics]. http://openarchive.nure.ua/handle/document/1555 (in Ukrainian)
2. Saaty, T. L. (1980). The analytic hierarchy process. McGraw-Hill. https://doi.org/10.21236/ADA214804
3. Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353. https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X
4. Keeney, R. L., & Raiffa, H. (1993). Decisions with multiple objectives: Preferences and value tradeoffs. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781139174084
5. Belton, V., & Stewart, T. J. (2002). Multiple criteria decision analysis: An integrated approach. Kluwer Academic Publishers. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1495-4
6. Malczewski, J. (1999). GIS and multicriteria decision analysis. John Wiley & Sons.
7. Munda, G. (2008). Social multi-criteria evaluation for a sustainable economy. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-73703-2
8. Hwang, C.-L., & Yoon, K. (1981). Multiple attribute decision making: Methods and applications. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9
9. Zolghadr-Asli, B., Bozorg-Haddad, O., & Chu, X. (2021). A review of 20-year applications of multi-attribute decision-making in environmental and water resources planning and management. *Environment, Development and Sustainability*. https://doi.org/10.1007/s10668-021-01278-3
10. Marttunen, M., Mustajoki, J., & Saarikoski, H. (2021). Complementary use of the ecosystem service concept and multi-criteria decision analysis in water management. *Environmental Management*, 68, 719–735. https://doi.org/10.1007/s00267-021-01501-x
11. Więckowski, J., & Sałabun, W. (2023). Sensitivity analysis approaches in multi-criteria decision analysis: A systematic review. *Applied Soft Computing*, 148, 110915. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110915
12. Digkoglou, P., Papathanasiou, J. (2025). Application of multiple criteria decision aiding in environmental policy-making processes. *International Journal of Environmental Science and Technology, 22*, 6967–6982. https://doi.org/10.1007/s13762-024-06101-w
13. Multi-criteria evaluation method for the selection of nature-based solutions for urban challenges. (2024). *Journal of Environmental Management, 373*, 123387. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123387

14. Bousquet M.,Kuller M., Lacroix S., Vanrolleghem P. A. A critical review of multicriteria decision analysis practices in nature-based solutions and green infrastructure planning. *Blue-Green Systems*, 5(2), 200–219. https://doi.org/10.2166/bgs.2023.132
15. Barbierato, E., et al. (2023). A method to prioritize and allocate nature-based solutions in urban areas. *Landscape and Urban Planning*, 235, 104739. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104743
16. Urban green space mapping from Sentinel-2 imagery: Recent applications and vegetation indices. (2025). Urban Science, 9(2), 23. https://doi.org/10.3390/urbansci9020023
17. Normalized Difference Vegetation Index threshold-based urban green space mapping from Sentinel-2A imagery. (2022). Land, 11(3), 351. https://doi.org/10.3390/land11030351
18. High-resolution greenspace dynamic data cube from Sentinel-2 for urban greenspace monitoring. (2024). Scientific Data. https://doi.org/10.1038/s41597-024-03746-7
19. NASA FIRMS. (2026). Active fire data. Retrieved from https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/active_fire/
20. NASA Earthdata. (2026). Active fire data attributes for MODIS and VIIRS. Retrieved from https://www.earthdata.nasa.gov/data/tools/firms/active-fire-data-attributes-modis-viirs
21. Google Earth Engine Data Catalog. (2026). JRC Global Surface Water Mapping Layers, v1.4. Retrieved from https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/JRC_GSW1_4_GlobalSurfaceWater
22. Global Surface Water. (2026). Data access. Retrieved from https://global-surface-water.appspot.com/download
23. ESA WorldCover. (2026). Worldwide land cover mapping. Retrieved from https://esa-worldcover.org/en
24. Copernicus Data Space Ecosystem. (2026). Open access to Copernicus Sentinel data and APIs. Retrieved from https://dataspace.copernicus.eu/
25. OpenAQ. (2026). OpenAQ API documentation. Retrieved from https://docs.openaq.org/
26. Humanitarian Data Exchange. (2026). Ukraine - Subnational administrative boundaries. Retrieved from https://data.humdata.org/dataset/cod-ab-ukr
27. Global Forest Watch Open Data Portal. (2026). Tree cover loss. Retrieved from https://data.globalforestwatch.org/documents/tree-cover-loss/explore
28. EkoZagroza. (2026). Official resource for recording environmental threats. Retrieved from https://ecozagroza.gov.ua/ (in Ukrainian)
29. Environmental management systems: Requirements with guidance for use. (2015). DSTU ISO 14001:2015. SE UkrNDNC. https://quality.nuph.edu.ua/wp-content/uploads/2018/10/%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3-ISO_14001-2015-.pdf (in Ukrainian)
30. OpenAQ R package. (2026). Access air quality data from the OpenAQ API. CRAN. Retrieved from https://cran.r-project.org/web/packages/openaq/openaq.pdf

The article was received by the editors 18.04.2026 The article was revised 18.05.2026
The article is recommended for printing 20.05.2026 This article published 30.05.2026

Н. О. БРИНЗА, канд. техн. наук, доц.
доцент кафедра інформатики та комп'ютерної техніки
e-mail: Natalia.Brynza@hneu.net ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0229-2874
Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця
пр. Науки, 9а, Харків, 61165, Україна

БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА ОЦІНКА ПРІОРИТЕТНОСТІ ПРИРОДООХОРОННИХ ЗАХОДІВ НА ОСНОВІ ВІДКРИТИХ ОНЛАЙН-ДАНИХ

Мета. Розробити й апробувати методику багатокритеріальної оцінки пріоритетності природоохоронних заходів на основі відкритих онлайн-даних за умов неповноти та інтервальної невизначеності вихідної інформації.

Методи. Системний аналіз, багатокритеріальне оцінювання, адитивну функцію корисності, експертне зважування критеріїв, нормалізацію показників і сценарний аналіз. Як інформаційну базу обґрунтовано використання відкритих джерел: NASA FIRMS для пожежної активності, JRC Global Surface Water для поверхневих вод, ESA WorldCover і Sentinel-2/Copernicus Data Space для земного та рослинного

покриву, OpenAQ для якості повітря, HDX для адміністративних меж, Global Forest Watch для втрат деревного покриву та ЕкоЗагрози як допоміжного джерела повідомлень про екологічні загрози.

Результати. Дослідження спрямоване на підтримку попереднього вибору першочергових дій у сфері екологічного менеджменту для урбанізованих територій, де одночасно актуальні проблеми зелених насаджень, водних об'єктів, порушених земель, атмосферного повітря, відходів і пожежної небезпеки. Проведено пілотний обчислювальний експеримент для умовної урбанізованої території Харківського регіону з шістьма альтернативами та шістьма критеріями.Сформовано експертно-інтервальну матрицю оцінювання природоохоронних заходів за критеріями екологічного ефекту, вартості, терміну реалізації, соціальної значущості, ризику бездіяльності та доступності онлайн-даних. Найвищі інтегральні оцінки за базовими вагами отримали удосконалення управління відходами та протипожежні заходи. Далі розташувалися очищення водних об'єктів, озеленення території, посилення моніторингу атмосферного повітря та рекультивація порушених земель. Сценарний аналіз показав, що перші дві альтернативи залишаються групою найвищої пріоритетності за різних схем вагових коефіцієнтів.

Висновки. Запропонована методика дає змогу формалізувати вибір природоохоронних пріоритетів навіть за умов неповної онлайн-інформації. Інтервальне представлення даних дозволяє не приховувати невизначеність, а використовувати її як окрему характеристику надійності управлінського рішення. Методика може бути застосована для попереднього обгрунтування програм охорони довкілля територіальних громад і потребує подальшої апробації на фактичних локальних наборах даних.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *природоохоронні заходи, багатокритеріальне оцінювання, екологічний менеджмент, онлайн-дані, інтервальна невизначеність, функція корисності*

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису немає. Крім того, автор повністю дотримувався етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Декларація про використання ШІ

Під час підготовки цього рукопису для організаційної підтримки, структурування тексту, редагування мови та виконання допоміжних обчислень використовувався штучний інтелект ChatGPT-5.5 (OpenAI, 2026). Дані штучного поля не використовувалися. Автор несе повну відповідальність за зміст, точність даних, інтерпретацію результатів та висновки..

Список використаної літератури

1. Бринза Н. О. Методи та математичні моделі прийняття багатокритеріальних рішень в умовах різнорідної інтервальної невизначеності : дис. ... канд. техн. наук : 01.05.04. Харків, 2013. 175 с. URL: http://openarchive.nure.ua/handle/document/1555
2. Saaty T. L. The Analytic Hierarchy Process. New York: McGraw-Hill, 1980. 287 p. https://doi.org/10.21236/ADA214804
3. Zadeh L. A. Fuzzy sets. Information and Control. 1965. Vol. 8, No. 3. P. 338–353. https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X
4. Keeney R. L., Raiffa H. Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs. Cambridge : Cambridge University Press, 1993. 569 p. https://doi.org/10.1017/CBO9781139174084
5. Belton V., Stewart T. J. Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach. Boston : Kluwer Academic Publishers, 2002. 372 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1495-4
6. Malczewski J. GIS and Multicriteria Decision Analysis. New York : John Wiley & Sons, 1999. 392 p.
7. Munda G. Social Multi-Criteria Evaluation for a Sustainable Economy. Berlin: Springer, 2008. 209 p. https://doi.org/10.1007/978-3-540-73703-2
8. Hwang C.-L., Yoon K. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. Berlin: Springer, 1981. 259 p. https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9
9. Zolghadr-Asli B., Bozorg-Haddad O., Chu X. A review of 20-year applications of multi-attribute decision-making in environmental and water resources planning and management. *Environment, Development and Sustainability*. 2021. https://doi.org/10.1007/s10668-021-01278-3
10. Marttunen M., Mustajoki J., Saarikoski H. Complementary use of the ecosystem service concept and multi-criteria decision analysis in water management. *Environmental Management*. 2021. Vol. 68. P. 719–735. https://doi.org/10.1007/s00267-021-01501-x
11. Więckowski J., Sałabun W. Sensitivity analysis approaches in multi-criteria decision analysis: A systematic review. *Applied Soft Computing*. 2023. Vol. 148. Article 110915. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110915

12. Digkoglou, P., Papathanasiou, J. (2025). Application of multiple criteria decision aiding in environmental policy-making processes. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2025. Vol. 22, 6967–6982. https://doi.org/10.1007/s13762-024-06101-w
13. Multi-criteria evaluation method for the selection of nature-based solutions for urban challenges. *Journal of Environmental Management*. 2024. Vol. 373. Article 123387. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123387
14. Bousquet M.,Kuller M., Lacroix S., Vanrolleghem P. A. A critical review of multicriteria decision analysis practices in nature-based solutions and green infrastructure planning. *Blue-Green Systems*. 2023. Vol. 5, No. 2. P. 200–219. https://doi.org/10.2166/bgs.2023.132
15. Longato D., Cortinovis C., Balzan M.,Geneletti D. A method to prioritize and allocate nature-based solutions in urban areas based on ecosystem service demand. *Landscape and Urban Planning.* 2023. Vol. 235. Article 104743. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104743
16. Urban green space mapping from Sentinel-2 imagery: recent applications and vegetation indices. *Urban Science*. 2025. Vol. 9, No. 2. Article 23. https://doi.org/10.3390/urbansci9020023
17. Normalized Difference Vegetation Index threshold-based urban green space mapping from Sentinel-2A imagery. *Land*. 2022. Vol. 11, No. 3. Article 351. https://doi.org/10.3390/land11030351
18. High-resolution greenspace dynamic data cube from Sentinel-2 for urban greenspace monitoring. *Scientific Data*. 2024. https://doi.org/10.1038/s41597-024-03746-7
19. NASA FIRMS. Active Fire Data. Fire Information for Resource Management System. URL: https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/active_fire/ (дата звернення: 29.03.2026).
20. NASA Earthdata. Active Fire Data Attributes for MODIS and VIIRS. URL: https://www.earthdata.nasa.gov/data/tools/firms/active-fire-data-attributes-modis-viirs (дата звернення: 29.03.2026).
21. Google Earth Engine Data Catalog. JRC Global Surface Water Mapping Layers, v1.4. URL: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/JRC_GSW1_4_GlobalSurfaceWater (дата звернення: 29.03.2026).
22. Global Surface Water. Data Access. URL: https://global-surface-water.appspot.com/download (дата звернення: 29.03.2026).
23. ESA WorldCover. Worldwide land cover mapping. URL: https://esa-worldcover.org/en (дата звернення: 29.03.2026).
24. Copernicus Data Space Ecosystem. Open access to Copernicus Sentinel data and APIs. URL: https://dataspace.copernicus.eu/ (дата звернення: 29.03.2026).
25. OpenAQ. OpenAQ API Documentation. URL: https://docs.openaq.org/ (дата звернення: 29.04.2026).
26. Humanitarian Data Exchange. Ukraine - Subnational Administrative Boundaries. URL: https://data.humdata.org/dataset/cod-ab-ukr (дата звернення: 29.04.2026).
27. Global Forest Watch Open Data Portal. Tree Cover Loss. URL: https://data.globalforestwatch.org/documents/tree-cover-loss/explore (дата звернення: 29.03.2026).
28. ЕкоЗагроза. Офіційний ресурс для фіксації екологічних загроз. URL: https://ecozagroza.gov.ua/ (дата звернення: 29.04.2026).
29. ДСТУ ISO 14001:2015. Системи екологічного управління. Вимоги та настанови щодо застосування. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. URL: https://quality.nuph.edu.ua/wp-content/uploads/2018/10/%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3-ISO_14001-2015-.pdf
30. OpenAQ R package. Access Air Quality Data from the OpenAQ API. CRAN. 2026. URL: https://cran.r-project.org/web/packages/openaq/openaq.pdf (дата звернення: 29.03.2026).

Стаття надійшла до редакції 18.04.2026 Переглянуто 18.05.2026
Стаття рекомендована до друку 20.05.2026 Опубліковано 30.05.2026

https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-12
UDC 504.06:336.5(477)

Y. O. MALYSHKO[1], PhD (Economy),
Associate Professor of the Department of Finance and Credit
e-mail: jekiaj@ukr.net ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-6691-1785

V.V. CHERNYSHOV[1], PhD (Economy),
Associate Professor of the Department of Finance and Credit
e-mail: chernyshov.vvv88@gmail.com ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-8866-0075

[1]*Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics*
9a, Nauky, Ave., Kharkiv, 61165, Ukraine

REGIONAL DIFFERENTIATION OF ENVIRONMENTAL RISKS AND ENVIRONMENTAL PROTECTION FINANCING IN UKRAINE BASED ON OPEN DATA

Purpose. To assess regional differentiation in environmental risks and environmental protection financing in Ukraine and to test a transparent risk-oriented screening approach for detecting oblasts where the relative level of environmental pressure is not matched by an adequate financial response.

Methods. The empirical analysis is based on open statistical and analytical data. Mathematical modeling is based on the differentiation of environmental risks and environmental financing, taking into account pollutant emissions from stationary sources, air pollution in cities, capital investments and current expenditures of enterprises on environmental protection. The risk index was formed by min-max normalisation of the emission and air-pollution variables.

Results. The problem is considered in the context of the spatial concentration of industrial emissions, the need for evidence-based allocation of environmental resources, and the growing importance of recovery planning under wartime constraints. A pilot sample of four oblasts was selected: Dnipropetrovsk, Donetsk, Zaporizhzhia and Kyiv. These regions were chosen because comparable environmental and financial indicators were simultaneously available for them. For each region, the regional share of national emissions, the maximum urban air pollution index, the cumulative financial response for 2014-2023, the share of this response, the environmental pressure-to-finance ratio and an integrated risk index were calculated. The selected regions together accounted for the largest number of pollutant emissions from stationary sources in 2021, confirming the pronounced spatial concentration of industrial atmospheric pressure. Dnipropetrovsk oblast ranked first by the integrated risk index, and also had the largest share of cumulative financial response. Donetsk oblast ranked second by risk, but demonstrated the strongest imbalance between pressure and financing. Zaporizhzhia oblast also showed an imbalance, Kyiv oblast had a lower atmospheric risk profile but a relatively higher financial share.

Conclusions. Open data can be used for preliminary diagnostics of regional discrepancies between environmental pressures and environmental protection financing. The proposed approach does not replace a full environmental assessment, but it can serve as an initial analytical module for identifying territories that require more detailed verification, targeted monitoring and priority consideration in regional environmental programmes. Further research should extend the model to a full panel of oblasts and include wartime environmental damage, waste, water, budget expenditure, environmental tax and socio-economic control variables.

KEYWORDS: *environmental risk, environmental protection financing, open data, regional differentiation, risk index, environmental safety*

Як цитувати: Malyshko Y. O., Chernyshov V. V. Regional differentiation of environmental risks and environmental protection financing in Ukraine based on open data. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2026. Вип. 34. С. 159-167. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-12

In cites: Malyshko, Y. O., & Chernyshov, V. V. (2026). Regional differentiation of environmental risks and environmental protection financing in Ukraine based on open data. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology,* (34), 159-167. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-12

© Malyshko Y. O., Chernyshov V. V., 2026

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0

Introduction

Aligning environmental pressure with an adequate financial response is one of the key issues of regional environmental management. For Ukraine, this issue has a dual nature. On the one hand, the historically established industrial specialisation of individual oblasts has resulted in a spatial concentration of emissions, waste generation and risks for public health. On the other hand, the full-scale war has significantly changed the spatial structure of environmental threats by increasing the role of damage to industrial facilities, energy infrastructure, water management systems and territories affected by hostilities.

Open data make it possible to assess these imbalances in a transparent and reproducible way. The State Statistics Service of Ukraine publishes indicators of pollutant and greenhouse gas emissions, including regional indicators and indicators per person [1]. Separate datasets are available on environmental protection expenditure, capital investments and current expenditure [2], and these datasets can be accessed and integrated through official digital instruments such as the developer API [3]. Additional contextual information is provided by the strategic environmental assessment report for the draft Circular Economy Strategy of Ukraine [4], the EcoZagroza platform [5], the Open Budget portal [6], regional environmental reports [7] and open summaries of regional environmental investments [8].

Contemporary international practice also shifts the focus from the formal accounting of environmental expenditure to the assessment of its effectiveness and its alignment with environmental needs. In the System of Environmental-Economic Accounting, environmental protection expenditure is considered within a broader system of environmental activities that describes the relationship between the economy and the environment [9, 10]. The Eurostat handbook provides methodological guidance for environmental protection expenditure accounts [11]. Green budgeting is increasingly used in OECD countries as an instrument for integrating climate and environmental priorities into the budget cycle [12], while European and international datasets make it possible to compare environmental protection expenditure across countries and policy levels [13, 14].

At the regional level, green budgeting and environmental risk management are also connected with the quality of governance and the ability to direct financial resources to priority environmental needs [15, 16]. Empirical studies show that green credit, environmental protection investment and green finance can influence environmental sustainability and the financial behaviour of enterprises [17, 18]. For Ukraine and other transition economies, research on financial management in regional environmental systems, automation of investment calculations and the relationship between government expenditure and green innovation further emphasises the need to connect environmental risks, financial instruments and regional development priorities [19, 20, 21].

For Ukraine, however, the unresolved question is whether the spatial distribution of environmental protection expenditure corresponds to the spatial distribution of environmental risk. Available open data often differ in periodicity, level of detail and completeness, especially for the wartime period. Therefore, a first step should be a screening approach that identifies the most visible regional asymmetries and forms a basis for more detailed analysis.

The purpose of the article is to assess the regional differentiation of environmental risks and environmental protection financing in Ukraine on the basis of open data and to test indicators that make it possible to compare environmental pressure with the financial response. To achieve this purpose, the following tasks are set: to systematise open data sources; to form a screening set of indicators; to calculate an integrated environmental risk index; to assess the ratio between a region's share in emissions and its share in environmental protection financing; and to identify regions with potential financial-environmental imbalance.

Methods

The object of the study is the regional differentiation of environmental risks and environmental protection financing in Ukraine. The subject of the study is the relationship between the level of atmospheric environmental pressure and the accumulated financial response in the form of capital investments and current expenditure for environmental protection.

The empirical part has the format of a pilot screening study. Four oblasts are included in the analysis: Dnipropetrovsk, Donetsk, Zaporizhzhia and Kyiv. The choice is determined by the fact that, for these oblasts, open sources simultaneously provide aggregated indicators of pollutant emissions from stationary sources for 2021 and comparable indicators of environmental protection capital investments and current expenditure of enterprises for 2014-2023. This sample does not replace a full panel of oblasts, but it allows the proposed methodology to be tested and its analytical applicability to be demonstrated.

The basic environmental indicator is the regional share of pollutant emissions from stationary sources in 2021 (Table 1). According to open materials of the strategic environmental assessment for the draft Circular Economy Strategy of Ukraine, Dnipropetrovsk oblast accounted for 24.8% of such emissions, Donetsk oblast for 18.0%, Zaporizhzhia oblast for 11.6% and Kyiv oblast for 5.1% [4]. An additional risk indicator is the maximum air pollution index (API) recorded for cities within the corresponding region in 2021 [4].

The financial block is formed on the basis of data on capital investments and current expenditure of enterprises for environmental protection in 2014-2023. According to an open summary of State Statistics Service data, capital investments amounted to UAH 108.46 billion and current expenditure to UAH 234.47 billion during this period [8]. For each region, the cumulative financial response is calculated as the sum of capital investments and current expenditure.

AI tools were not used for data collection, statistical calculation or generation of empirical results. AI-assisted tools were used only for organisational support, language editing, structuring of the manuscript and technical formatting; all data, calculations, interpretations and conclusions were verified by the author.

The regional share in the financial response is calculated as follows:

$$FS_i = ((CI_i + CE_i) / \Sigma_i(CI_i + CE_i)) \times 100\%, \quad (1)$$

where FS_i – the share of i-region in cumulative environmental protection expenditure;

CI_i – capital investment in i-region;

CE_i – current expenditure in i-region;

Σ_i(CI_i + CE_i) – the total amount of capital investment and current expenditure in i-region Ukraine for 2014-2023.

To assess imbalance, the environmental pressure-to-finance ratio is used:

$$PFR_i = ES_i / FS_i, \quad (2)$$

where ES_i is the share of i-region in emissions from stationary sources and FS_i is the share of i-region in the financial response. A PFR_i value above 1 means that the region's share in environmental pressure exceeds its share in the financial response.

The integrated risk index is calculated as the average of two normalised indicators: the regional share of emissions and the maximum API of cities in the region. Min-max normalisation is applied:

$$x'_\{ij\} = (x_\{ij\} - \min(x_j)) / (\max(x_j) - \min(x_j)), \quad (3)$$

$$RI_i = (ES'_i + API'_i) / 2. \quad (4)$$

For classification of regions, median values of the integrated risk index and the share of the financial response are used.

Table 1

Initial indicators for assessing environmental pressure and financial response

Region	Emissions 2021, thous. t	Emission share, %	Max. API	Capital investments, UAH bn	Current expenditure, UAH bn	Total, UAH bn
Dnipropetrovsk oblast	556.1	24.8	14.7	31.00	71.62	102.62
Donetsk oblast	403.4	18.0	15.7	10.84	15.93	26.77
Zaporizhzhia oblast	260.3	11.6	8.0	7.49	20.88	28.37
Kyiv oblast	113.7	5.1	4.3	30.08	9.39	39.47

Note. Compiled by the author based on data from [4, 8].

Results of Research

The dataset shows a significant concentration of industrial atmospheric pressure in a small group of regions (Table 1). The four analysed oblasts accounted for 59.5% of pollutant emissions from stationary sources in 2021. Dnipropetrovsk oblast had the largest share, 24.8%. Donetsk and Zaporizhzhia oblasts jointly formed another 29.6%. This confirms the thesis that industrial environmental risks are concentrated in eastern and south-eastern regions.

Comparison of environmental pressure and environmental protection financing revealed an asymmetry (Table 2). Dnipropetrovsk oblast has high environmental risk, but also the highest share of accumulated financial response, 29.9% of the total amount of capital investments and current expenditure of enterprises for 2014-2023. By contrast, Donetsk oblast has 18.0% of emissions but only 7.8% of the financial response, resulting in a PFR of 2.31. For Zaporizhzhia oblast, the PFR is 1.40, which also indicates that the share of environmental pressure exceeds the share of financing.

Kyiv oblast has the opposite profile: its share of emissions is 5.1%, whereas its share of the financial response is 11.5%. This may be related to infrastructure, wastewater treatment or municipal projects that are not fully reflected by the atmospheric emissions indicator. This result demonstrates the need to include not only air emissions in a complete model, but also waste, water risks, the condition of wastewater treatment facilities, the impact of hostilities and other components of environmental safety.

Table 2

Calculation of environmental risk and environmental protection finance adequacy indicators

Region	Finance share, %	Pressure/ finance	Risk index	Risk rank	Finance rank	Type and interpretation
Dnipropetrovsk oblast	29.9	0.83	0.956	1	1	High risk - high financial response; finance share is not lower than pressure share
Donetsk oblast	7.8	2.31	0.827	2	4	High risk - lower financial response; imbalance
Zaporizhzhia oblast	8.3	1.40	0.327	3	3	Lower risk - lower financial response within the sample; imbalance
Kyiv oblast	11.5	0.44	0.000	4	2	Lower risk - high financial response; finance share is not lower than pressure share

Note. A pressure-to-finance ratio above 1 means that the region's share in environmental pressure exceeds its share in the financial response.

The integrated risk index (Fig. 1) produces the following sequence: Dnipropetrovsk oblast, 0.956; Donetsk oblast, 0.827; Zaporizhzhia oblast, 0.327; and Kyiv oblast, 0.000. Accordingly, in the risk-financing matrix, Dnipropetrovsk oblast belongs to the group 'high risk - high financial response', Donetsk oblast to the group 'high risk - lower financial response', Zaporizhzhia oblast to the group 'lower risk - lower financial response' within the sample, and Kyiv oblast to the group 'lower risk - high financial response'.

In terms of the air pollution index in 2021 (Table 3), the most problematic cities were Mariupol, Kamianske, Dnipro, Odesa and Kryvyi Rih. Within the selected sample, this strengthens the risk positions of Donetsk and Dnipropetrovsk

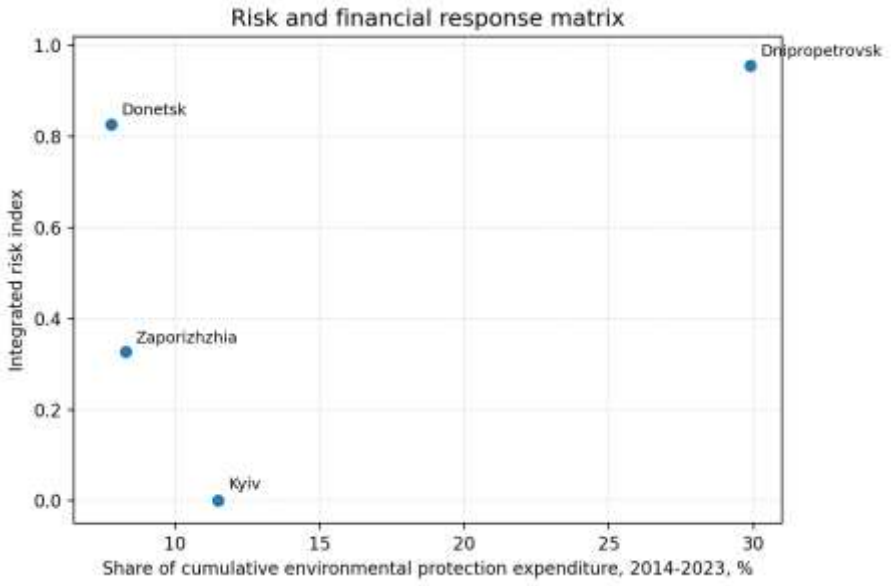


Fig. 1 - Matrix of integrated risk and financial response

Table 3

Cities with the highest air pollution index in 2021

Rank	City	Region	API
1	Mariupol	Donetsk oblast	15.7
2	Kamianske	Dnipropetrovsk oblast	14.7
3	Dnipro	Dnipropetrovsk oblast	12.8
4	Odesa	Odesa oblast	12.5
5	Kryvyi Rih	Dnipropetrovsk oblast	12.1
6	Kyiv	City of Kyiv	8.6
7	Mykolaiv	Mykolaiv oblast	8.5
8	Zaporizhzhia	Zaporizhzhia oblast	8.0
9	Kherson	Kherson oblast	7.8
10	Kremenchuk	Poltava oblast	7.5

Note. An API level above 14.0 is classified as very high; 7.0-14.0 as high; 5.0-7.0 as elevated; and less than 5.0 as low [4].

oblasts. The highest maximum API was recorded for Donetsk oblast through Mariupol, 15.7; for Dnipropetrovsk oblast through Kamianske, 14.7; for Zaporizhzhia oblast through Zaporizhzhia, 8.0; and for Kyiv oblast through Bila Tserkva, 4.3.

Discussion

The obtained results have a screening character, but they demonstrate the practical usefulness of open data for the preliminary diagnosis of regional financial-environmental imbalances. The most important result is not the absolute ranking of regions, but the identification of different types of relationships between environmental pressure and financial response.

Dnipropetrovsk oblast is an example of a region where a high level of risk is accompanied by a significant environmental protection

financial response. This does not mean that financing is sufficient, but it indicates the presence of large environmental protection expenditures that are comparable with the industrial profile of the region. Donetsk oblast, by contrast, demonstrates the largest gap between its share in emissions and its share in financing. Given wartime restrictions, damage to industrial and environmental infrastructure and incomplete statistics after 2022, this result should be interpreted carefully, but regions with such profiles should be the subject of priority monitoring.

For Zaporizhzhia oblast, the imbalance is less pronounced, but a PFR value above 1 indicates the need to strengthen the environmental protection response or to analyse the structure of expenditure in greater detail. Kyiv oblast demonstrates a higher financial share compared with the atmospheric risk indicator, which may result from the fact that financing is directed not only towards the reduction of industrial emissions, but also towards other environmental protection areas.

The scientific novelty of the study consists in testing a simple index approach that integrates open environmental and financial indicators into a risk-financing matrix. In contrast to traditional descriptive analysis of emissions or expenditure separately, the proposed approach makes it possible to formulate a management question: whether the relative amount of environmental protection expenditure corresponds to the relative level of environmental pressure.

The practical significance of the results lies in the possibility of using this approach as a preliminary module for regional environmental programmes, budget planning, recovery strategies and the formation of environmental priorities for communities. In an extended version, the model should include budget expenditure by functional classification, EcoZagroza data on wartime environmental damage, indicators of waste generation and disposal, discharges of polluted wastewater, the condition of protected areas and socio-demographic variables.

The main limitation of the study is the use of different time horizons: environmental indicators are taken for 2021, whereas financial indicators are cumulative for 2014-2023. This limitation is determined by the availability of open regional data. Additional limitations include incomplete coverage of oblasts, insufficient updating of indicators for the wartime period and the impossibility, within a pilot study, of including all components of environmental risk.

Conclusions

Open data make it possible to form a preliminary toolkit for assessing the regional differentiation of environmental risks and environmental protection financing in Ukraine. The most suitable sources are State Statistics Service data on emissions and environmental protection expenditure, strategic environmental assessment materials, the Open Budget portal, EcoZagroza and regional environmental reports.

Within the pilot sample, the concentration of industrial atmospheric pressure in Dnipropetrovsk, Donetsk and Zaporizhzhia oblasts is confirmed. The four analysed oblasts jointly accounted for 59.5% of pollutant emissions from stationary sources in 2021.

The calculated environmental pressure-to-finance ratio shows the largest imbalance for Donetsk oblast, where the share in emissions is 2.31 times higher than the share in cumulative environmental protection expenditure. For Zaporizhzhia oblast, the ratio is 1.40. Dnipropetrovsk oblast has high risk but also a high financial response, whereas Kyiv oblast has a lower atmospheric risk with a relatively high share of financing.

The proposed risk index and risk-financing matrix can be used as an instrument for preliminary prioritisation of regions for further environmental analysis. They should be applied not as a final ranking, but as a diagnostic module that identifies territories for in-depth verification.

A prospect for further research is the formation of a full panel dataset in the format 'oblast-year' for 2019-2024 with the inclusion of budget expenditure, environmental tax, data on waste, water, atmospheric air, wartime environmental damage and socio-economic control variables. Such a dataset would make it possible to move from screening analysis to econometric assessment of the determinants of environmental protection financing.

Conflict of interest

The authors declare that there are no conflicts of interest in the publication of this manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

Authors Contribution: all authors have contributed equally to this work.

AI Statement

During preparation of this manuscript, artificial intelligence tools ChatGPT-5.5 (OpenAI, 2026) were used for organisational support, language editing, text structuring, technical formatting and preliminary checking of the logic of presentation. All data, sources, calculations, interpretations and conclusions were verified by the author; the author is responsible for the content of the manuscript.

References

1. State Statistics Service of Ukraine. (n.d.). Emissions of pollutants and greenhouse gases into the atmosphere. Retrieved from https://stat.gov.ua/uk/datasets/vykydy-zabrudnyuyuchykh-rechovyn-i-parnykovykh-haziv-v-atmosferne-povitrya (in Ukrainian)
2. State Statistics Service of Ukraine. (n.d.). Costs of environmental protection. Retrieved from https://stat.gov.ua/uk/datasets/vytraty-na-okhoronu-navkolyshnoho-pryrodnoho-seredovyshcha (in Ukrainian)
3. State Statistics Service of Ukraine. (n.d.). Developer API. Retrieved from https://stat.gov.ua/uk/development-api (in Ukrainian)
4. Ministry of Economy of Ukraine. (n.d.). Strategic environmental assessment report for the draft Circular Economy Strategy of Ukraine. Retrieved from https://me.gov.ua/download/c944f6e5-9609-4136-a6a8-8a9545c74b01/file.pdf (in Ukrainian)
5. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. (n.d.). EcoZagroza. Retrieved from https://ecozagroza.gov.ua/ (in Ukrainian)
6. Ministry of Finance of Ukraine. (n.d.). Open Budget. Retrieved from https://openbudget.gov.ua/ (in Ukrainian)
7. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. (n.d.). Regional reports on the state of the environment in Ukraine. Retrieved from https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoryng/regionalni-dopovidi-pro-stan-navkolyshnogo-seredovyshha-v-ukrayini/ (in Ukrainian)
8. Sydorova, A. (2024). Over 10 years, enterprises allocated UAH 343 billion to environmental protection. Skilky-Skilky. Retrieved from https://skilky-skilky.info/za-desiat-rokiv-na-okhoronu-dovkillia-pidpryiemstva-spriamuvaly-343-mlrd-hrn/ (in Ukrainian)
9. System of Environmental-Economic Accounting 2012 Central Framework. (2014). New York: United Nations. Retrieved from https://seea.un.org/content/seea-central-framework
10. Environmental Activity Accounts. System of Environmental Economic Accounting. Retrieved from https://seea.un.org/content/environmental-activity-accounts
11. Environmental protection expenditure accounts handbook. 2017 edition. Luxembourg: Publications Office of the European Union. (2017). Eurostat. Retrieved from https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-manuals-and-guidelines/-/ks-gq-17-004
12. Green Budgeting: Governing Green through the Budget Cycle. (2023). OECD. Retrieved from https://one.oecd.org/document/GOV/SBO(2023)12/en/pdf
13. Environmental protection expenditure. 8th EAP indicator. (2025). European Environment Agency. Retrieved from https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/environmental-protection-expenditure-8th-eap
14. Environmental Protection Expenditures. Macroeconomic Climate Data. International Monetary Fund. (n.d.). Retrieved from https://climatedata.imf.org/datasets/d22a6decd9b147fd9040f793082b219b_0/about
15.. The implementation of green budgets at local and regional levels. (2022). European Committee of the Regions Retrieved from https://edz.bib.uni-mannheim.de/edz/doku/adr/2022/cdr-2022-0105-en.pdf
16. The state of climate-related and environmental risk management in the banking sector. (2021). European Central Bank. Retrieved from https://www.bankingsupervision.europa.eu/ecb/pub/pdf/ssm.202111guideonclimate-relatedandenvironmentalrisks~4b25454055.en.pdf
17. Li, J., Jia, P., & Yan, J. (2021). Green credit, environmental protection investment and debt financing for heavily polluting enterprises. PLOS ONE, 16(12), e0261311. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0261311
18. Naseer, M. M., Mohsin, M., Zia-Ur-Rehman, M., Baig, S. A., & Sarfraz, M. (2022). Green finance development and environmental sustainability: A panel data analysis. *Frontiers in Environmental Science*, 10. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1039705
19. Koval, V., Olczak, P., Hakova, M., Bilyi, M., Kretov, D., & Laktionova, O. (2023). Analysis of financial outsourcing management in regional environmental systems. *Sustainability*, 15(15), 11966. https://doi.org/10.3390/su151511966
20. Pronoza, P., Chernyshov, V., Malyshko, Y., & Aleksieienko, I. (2023). Optimization of business processes in investment using automation technology, financial calculations, and risk assessment methods. Eastern-European *Journal of Enterprise Technologies*, 2(13(122)), 102-113. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276098

21. Wang, Z., & Wang, T. (2025). Government environmental protection expenditure and regional green innovation: The moderating role of R&D element flow in China. *Sustainability*, 17(22), 10399. https://doi.org/10.3390/su172210399

The article was received by the editors 19.04.2026 The article was revised 20.05.2026
The article is recommended for printing 23.05.2026 This article published 30.05.2026

Є. О. МАЛИШКО[1], канд. екон. наук, доц.
доцент кафедри фінансів і кредиту
e-mail: jekiaj@ukr.net ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-6691-1785

В. В. ЧЕРНИШОВ[1], канд. екон. наук, доц.
доцент кафедри фінансів і кредиту
e-mail: chernyshov.vvv88@gmail.com ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-8866-0075

[1]*Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця*
просп. Науки, 9-А, м. Харків, , 61165 Україна

РЕГІОНАЛЬНА ДИФЕРЕНЦІАЦІЯ ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ ТА ПРИРОДООХОРОННОГО ФІНАНСУВАННЯ В УКРАЇНІ НА ОСНОВІ ВІДКРИТИХ ДАНИХ

Мета. Оцінювання регіональної диференціації екологічних ризиків і природоохоронного фінансування в Україні та апробація прозорого ризик-орієнтованого скринінгового підходу до виявлення областей, у яких відносний рівень екологічного тиску не відповідає належній фінансовій реакції.

Методи. Емпіричний аналіз ґрунтується на відкритих статистичних та аналітичних даних. Математичне моделювання базується на диференціації екологічних ризиків та природоохоронного фінансування з врахуванням викидів забруднюючих речовин від стаціонарних джерел, забрудненні атмосферного повітря в містах, капітальних інвестицій та поточних витрат підприємств на охорону навколишнього природного середовища. Індекс ризику сформовано шляхом мінімаксної нормалізації показників викидів і забруднення повітря.

Результати. Проблему розглянуто в контексті просторової концентрації промислових викидів, потреби в доказовому розподілі природоохоронних ресурсів і зростання значення планування відновлення в умовах воєнних обмежень. До пілотної вибірки включено Дніпропетровську, Донецьку, Запорізьку та Київську області, для яких одночасно доступні зіставні екологічні й фінансові показники. Для кожної області розраховано частку у загальнонаціональних викидах, максимальний міський індекс забруднення атмосферного повітря, сукупну фінансову відповідь за 2014-2023 рр., частку цієї відповіді, коефіцієнт співвідношення екологічного тиску та фінансування, а також інтегральний індекс ризику. На вибрані області разом припадало найбільша кількість викидів забруднюючих речовин від стаціонарних джерел у 2021 році, що підтверджує виражену просторову концентрацію промислового атмосферного тиску. Дніпропетровська область посіла перше місце за інтегральним індексом ризику зі значенням і водночас мала найбільшу частку сукупної фінансової відповіді. Донецька область посіла друге місце за рівнем ризику однак продемонструвала найсильніший дисбаланс між тиском і фінансуванням. Запорізька область також мала дисбаланс, Київська область характеризувалася нижчим атмосферним ризиком, але відносно вищою фінансовою часткою.

Висновки. Можливе використання відкритих даних для попередньої діагностики регіональних невідповідностей між екологічним навантаженням і природоохоронним фінансуванням. Запропонований підхід не замінює повної екологічної оцінки, проте може слугувати початковим аналітичним модулем для визначення територій, що потребують детальнішої перевірки, цільового моніторингу та пріоритетного врахування у регіональних природоохоронних програмах. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення моделі до повної панелі областей із включенням воєнної шкоди довкіллю, відходів, водних ризиків, бюджетних видатків, екологічного податку та соціально-економічних контрольних змінних.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *екологічний ризик, природоохоронне фінансування, відкриті дані, регіональна диференціація, індекс ризику, екологічна безпека*

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Декларація про використання ШІ

Під час підготовки цього рукопису для організаційної підтримки, мовного редагування, структурування тексту, технічного форматування та попередньої перевірки логіки викладу використовувалися інструменти штучного інтелекту ChatGPT-5.5 (OpenAI, 2026). Усі дані, джерела, розрахунки, інтерпретації та висновки були перевірені автором; автор несе відповідальність за зміст рукопису.

Список використаної літератури

1. Кількість викидів забруднюючих речовин і парникових газів в атмосферне повітря. Держстат.URL: https://stat.gov.ua/uk/publications/kilkist-vykydiv-zabrudnyuyuchykh-rechovyn-i-parnykovykh-haziv-v-atmosferne-povitrya
2. Витрати на охорону навколишнього природного середовища. Держстат URL: https://stat.gov.ua/uk/datasets/vytraty-na-okhoronu-navkolyshnoho-pryrodnoho-seredovyshcha
3. Розробницький API. Держстат. URL: https://stat.gov.ua/uk/development-api
4. Звіт про дослідження CEO - Стратегічна екологічна оцінка проекту стратегії циркулярної економіки України. 2025. URL: https://me.gov.ua/download/c944f6e5-9609-4136-a6a8-8a9545c74b01/file.pdf
5. ЕкоЗагроза. Офіційний ресурс Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України. 2026 URL: https://ecozagroza.gov.ua/
6. Державний веб-портал бюджету для громадян. Open Budget. URL: https://openbudget.gov.ua/
7. Регіональні доповіді про стан навколишнього природного середовища в Україні. URL: https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoryng/regionalni-dopovidi-pro-stan-navkolyshnogo-seredovyshha-v-ukrayini/
8. Sydorova, A. (2024). За 10 років на охорону довкілля підприємства спрямували 343 млрд грн. Скільки-Скільки. URL: https://skilky-skilky.info/za-desiat-rokiv-na-okhoronu-dovkillia-pidpryiemstva-spriamuvaly-343-mlrd-hrn/
9. System of Environmental-Economic Accounting 2012 Central Framework. (2014). New York: United Nations. URL: https://seea.un.org/content/seea-central-framework
10. Environmental Activity Accounts. System of Environmental Economic Accounting. URL: https://seea.un.org/content/environmental-activity-accounts
11. Eurostat. (2017). Environmental protection expenditure accounts handbook. 2017 edition. Luxembourg: Publications Office of the European Union. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-manuals-and-guidelines/-/ks-gq-17-004
12. OECD. (2023). Green Budgeting: Governing Green through the Budget Cycle. URL: https://one.oecd.org/document/GOV/SBO(2023)12/en/pdf
13. European Environment Agency. (2025). Environmental protection expenditure. 8th EAP indicator. URL: https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/environmental-protection-expenditure-8th-eap
14. International Monetary Fund. (n.d.). Environmental Protection Expenditures. Macroeconomic Climate Data. URL: https://climatedata.imf.org/datasets/d22a6decd9b147fd9040f793082b219b_0/about
15. European Committee of the Regions. (2022). The implementation of green budgets at local and regional levels. URL: https://edz.bib.uni-mannheim.de/edz/doku/adr/2022/cdr-2022-0105-en.pdf
16. European Central Bank. (2021). The state of climate-related and environmental risk management in the banking sector. URL: https://www.bankingsupervision.europa.eu/ecb/pub/pdf/ssm.202111guideonclimate-relatedandenvironmentalrisks~4b25454055.en.pdf
17. Li, J., Jia, P., & Yan, J. (2021). Green credit, environmental protection investment and debt financing for heavily polluting enterprises. *PLOS ONE*, 16(12), e0261311. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0261311
18. Naseer, M. M., Mohsin, M., Zia-Ur-Rehman, M., Baig, S. A., & Sarfraz, M. (2022). Green finance development and environmental sustainability: A panel data analysis. *Frontiers in Environmental Science*, 10. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1039705
19. Koval, V., Olczak, P., Hakova, M., Bilyi, M., Kretov, D., & Laktionova, O. (2023). Analysis of financial outsourcing management in regional environmental systems. *Sustainability*, 15(15), 11966. https://doi.org/10.3390/su151511966
20. Pronoza, P., Chernyshov, V., Malyshko, Y., & Aleksieienko, I. (2023). Optimization of business processes in investment using automation technology, financial calculations, and risk assessment methods. Eastern-European *Journal of Enterprise Technologies*, 2(13(122)), 102-113. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276098
21. Wang, Z., & Wang, T. (2025). Government environmental protection expenditure and regional green innovation: The moderating role of R&D element flow in China. *Sustainability*, 17(22), 10399. https://doi.org/10.3390/su172210399

Стаття надійшла до редакції 19.04.2026 Переглянуто 20.05.2026
Стаття рекомендована до друку 23.05.2026 Опубліковано 30.05.2026

https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-13
УДК (UDC): 005.8:502.131.1:640.4

В. Л. БЕЗСОННИЙ, д-р. техн. наук, доц.,
професор кафедри готельного, ресторанного бізнесу і крафтових технологій
e-mail: vitalii.bezsonnyi@hneu.net ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-8089-7724

Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця,
пр. Науки, 9а, м. Харків, 61165

ПРОЄКТНИЙ ПІДХІД ДО ВПРОВАДЖЕННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТІ ЕКОЛОГІЧНОГО МЕНЕДЖМЕНТУ ГОТЕЛЬНО-РЕСТОРАННОГО БІЗНЕСУ

Підприємства сфери гостинності щоденно генерують екологічне навантаження через споживання енергії й води, утворення харчових і пакувальних відходів, використання мийних засобів, логістику постачання та сервісні процеси, однак екологічні практики часто впроваджуються фрагментарно, без єдиної системи цілей, відповідальності й моніторингу.

Мета. Розробка проєктно-орієнтованого підходу до впровадження системи екологічного менеджменту в готельно-ресторанному бізнесі на основі аналізу відкритих онлайн-джерел щодо екологічних практик підприємств HORECA та побудови прикладної моделі управління екологічним проєктом.

Методи. Системний аналіз, контент-аналіз відкритих вебджерел, порівняльний аналіз, проєктне моделювання, WBS-структурування, RACI-підхід до розподілу відповідальності, матрицю ризиків і KPI-аналіз.

Результати. Емпіричну базу сформовано за результатами онлайн-аналізу 30 відкритих вебджерел: 8 корпоративних сайтів і звітних сторінок готельних груп, що працюють на європейському ринку, та 22 ресторанних мереж, представлених у відкритому рейтингу сталості Which?. Вибірка має цільовий характер; тому результати інтерпретовано як показники публічного екологічного розкриття, а не як статистично репрезентативну оцінку всього сектору HORECA. Для узагальнення даних застосовано частки, ранжування індикаторів і індекс публічного екологічного розкриття. Встановлено, що найбільш публічно розкритими практиками є енергетичні та кліматичні цілі, управління відходами і наявність загальних цільових орієнтирів, тоді як слабшими залишаються прозорість щодо водоспоживання, кількісне розкриття харчових відходів, локальне постачання та деталізація відповідальності на рівні окремого закладу. За узагальненим індексом публічного екологічного розкриття готельні групи досягли найбільшого його значення, чим ресторанні мережі, що вказує на вищу інституціоналізацію екологічного менеджменту у готельному сегменті. Для ресторанних мереж найбільшу частку позитивних оцінок зафіксовано за блоками «цілі» та «відходи і пластик», а найнижчу – за блоками «прозорість і вибір споживача» та «політики постачання».

Висновки. Впровадження системи екологічного менеджменту у готельно-ресторанному бізнесі доцільно організовувати як управлінський проєкт із чіткими фазами ініціації, аудиту, планування, реалізації, моніторингу, внутрішнього перегляду та коригувальних дій. Запропонована модель може бути використана підприємствами HORECA для переходу від окремих екологічних ініціатив до системного управління екологічною результативністю. Межі узагальнення результатів визначаються невипадковим характером вибірки та використанням відкритих онлайн-джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *екологічний менеджмент, управління проєктами, готельно-ресторанний бізнес, ресурсоефективність, відходи, сталий розвиток*

Як цитувати: Безсонний В. Л. Проєктний підхід до впровадження та оцінювання результативності екологічного менеджменту готельно-ресторанного бізнесу. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2026. Вип. 34. С. 168-180. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-13

In cites: Bezsonnyi, V. L. (2026). Project-based approach to the implementation and performance evaluation of environmental management in the hotel and restaurant business. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology,* (34), 168-180. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-13 (in Ukrainian)

© Безсонний В. Л., 2026

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0

Вступ

Сфера гостинності (HORECA) є важливою частиною сервісної економіки та водночас сектором, у якому щоденні операційні процеси безпосередньо пов'язані з використанням природних ресурсів і формуванням відходів. Готелі, ресторани, кафе та готельно-ресторанні комплекси споживають значні обсяги електроенергії, тепла, води, мийних засобів, харчової сировини, пакування та одноразових матеріалів. Тому екологічний менеджмент у HORECA не може розглядатися лише як іміджева або комунікаційна практика. Він має бути частиною операційного управління, системи якості, управління ризиками та стратегічного розвитку підприємства.

Міжнародний стандарт ISO 14001 визначає систему екологічного менеджменту як рамку, що допомагає організації проєктувати, впроваджувати та постійно поліпшувати екологічну результативність, охоплюючи ресурсокористування, управління відходами, моніторинг показників і залучення стейкхолдерів [1]. Логіка ISO 14001 тісно пов'язана з циклом Plan-Do-Check-Act, у якому організація формує екологічну політику, планує цілі та дії, реалізує їх, оцінює результативність і переглядає систему управління [2]. Для підприємств гостинності це означає необхідність переходу від окремих ініціатив до системного портфеля екологічних заходів, інтегрованих у щоденні бізнес-процеси.

Європейський підхід до сталого туризму також підкреслює значення екологічного менеджменту, енерго- і водоефективності та скорочення відходів. Зокрема, EU Ecolabel для туристичного розміщення визначає екологічну сертифікацію як інструмент демонстрації високих стандартів управління довкіллям, енергоефективності, водоефективності та зменшення відходів [3]. Green Key, своєю чергою, позиціонується як стандарт екологічної відповідальності та сталої операційної діяльності для готелів, ресторанів, конференц-центрів та інших туристичних об'єктів [4].

У науковій літературі останніх років активно розглядаються питання оцінювання екологічної сталості готелів, екологічної сертифікації, харчових відходів у закладах харчування, циркулярних практик, відповідального постачання, ролі ESG-звітності та цифрового моніторингу [17-20]. Значна частина сучасних досліджень підтверджує, що екологічна результативність підприємств гостинності залежить не лише від наявності окремих «зелених» заходів, а й від системності управління, регулярності вимірювання показників, прозорості звітності та залучення персоналу. Водночас у наявних публікаціях недостатньо розкрито питання методичного поєднання екологічного менеджменту з інструментами управління проєктами: структурою робіт, матрицею відповідальності, ризиками, етапністю, контрольними точками та KPI.

Практична проблема полягає в тому, що навіть підприємства, які декларують сталість, часто розкривають різні блоки інформації нерівномірно: одні публікують ESG-звіти, інші вказують лише загальні екологічні наміри, треті повідомляють про відмову від пластику або локальні продукти, але не подають кількісних показників, а така фрагментарність ускладнює оцінювання результативності, порівняння закладів і планування екологічних проєктів на рівні окремого підприємства.

Метою дослідження є розроблення проєктно-орієнтованого підходу до впровадження системи екологічного менеджменту в готельно-ресторанному бізнесі на основі аналізу відкритих онлайн-джерел щодо екологічних практик підприємств HORECA та побудови прикладної моделі управління екологічним проєктом.

Для досягнення мети поставлено такі завдання: узагальнити екологічні аспекти діяльності підприємств HORECA; визначити індикатори онлайн-розкриття екологічних практик; провести контент-аналіз вибірки сайтів і звітних сторінок готельних та ресторанних підприємств; систематизувати виявлені закономірності; розробити модель проєкту впровадження системи екологічного менеджменту; запропонувати систему KPI та матрицю ризиків.

Наукова новизна дослідження полягає в інтеграції інструментів екологічного менеджменту та проєктного управління для підприємств HORECA на основі аналізу публічного екологічного розкриття, що дозволяє перейти від опису окремих екологічних

практик до побудови прикладної EMS-моделі з визначеними фазами реалізації, ризиками, відповідальними особами та вимірюваними KPI.

Методика

Об'єктом дослідження є екологічні практики підприємств готельно-ресторанного бізнесу, які розкриті у відкритих вебджерелах. Предметом дослідження є проєктний підхід до впровадження системи екологічного менеджменту в закладах HORECA.

Емпіричну базу сформовано на основі 30 одиниць аналізу. До вибірки включено 8 корпоративних сайтів або звітних сторінок готельних груп, що працюють на європейському ринку: Accor, Hilton, Marriott International, IHG, Radisson Hotel Group, Scandic Hotels, NH Hotels, Hyatt. Друга частина вибірки охоплює 22 ресторанні мережі, представлені у відкритому дослідженні Which? щодо сталості найбільших ресторанних мереж Великої Британії: Wahaca, Nando's, Frankie & Benny's, Young's Pubs, Pret a Manger, Wagamama, Beefeater, Brewers Fayre, Burger King, LEON, Domino's, JD Wetherspoon, Pizza Hut, Ask Italian, Harvester, Prezzo, Toby Carvery, Zizzi, McDonald's, Bella Italia, Greggs, KFC [13] (табл. 1).

Вибірка є цільовою, а не статистично випадковою. Критеріями включення були: наявність відкритої вебсторінки, ESG-звіту, звіту зі сталого розвитку або публічного рейтингу з деталізацією екологічних практик; належність до готельного, ресторанного або готельно-ресторанного сектору; операційна присутність на європейському ринку; можливість ідентифікувати щонайменше три з визначених індикаторів екологічної діяльності. Отже, результати не слід інтерпретувати як

Таблиця 1

Характеристика вибірки онлайн-дослідження

Table 1

Characteristics of the online research sample

Група	Одиниці аналізу	n	Джерело даних
Готельні групи	Accor; Hilton; Marriott International; IHG; Radisson Hotel Group; Scandic Hotels; NH Hotels; Hyatt	8	Офіційні корпоративні сайти, сторінки сталості, ESG/ Responsible Business матеріали
Ресторанні мережі	Wahaca; Nando's; Frankie & Benny's; Young's Pubs; Pret a Manger; Wagamama; Beefeater; Brewers Fayre; Burger King; LEON; Domino's; JD Wetherspoon; Pizza Hut; Ask Italian; Harvester; Prezzo; Toby Carvery; Zizzi; McDonald's; Bella Italia; Greggs; KFC	22	Відкритий рейтинг Which? та офіційні сторінки окремих мереж
Усього	Підприємства та мережі HORECA, представлені на європейському ринку	30	Відкриті онлайн-джерела станом на квітень 2026 р.

статистично репрезентативну характеристику всього сектору HORECA. Вони відображають рівень, структуру та проблемні зони публічного онлайн-розкриття екологічних практик серед підприємств, для яких доступні відкриті sustainability-матеріали.

Кодування здійснювалося за сімома групами індикаторів: 1) наявність екологічної політики, ESG-звіту або сторінки сталості; 2) енергоефективність, вуглецеві цілі або відновлювана енергія; 3) водозбереження або моніторинг водоспоживання; 4) управління відходами, зокрема харчовими відходами; 5) скорочення одноразового пластику або пакування; 6) локальне, відповідальне або стале постачання; 7) сертифікація, KPI, зовнішня верифікація або кількісна звітність. Для готельних груп застосовувалося бінарне кодування наявності/відсутності відповідного блоку у відкритих матеріалах. Для ресторанної частини вибірки категорії Which? було інтерпретовано так: «resources and emissions» відповідає енерго-, водо- та кліматичному блоку; «sourcing policies» – відповідальному постачанню; «waste and plastics» – відходам і пакуванню; «transparency and customer choice» – відкритості й комунікації; «targets» – наявності цільових орієнтирів [13]. Значення 60 % і вище у відповідній категорії розглядалося як

ознака достатнього рівня публічного розкриття, оскільки воно свідчить про переважання позитивних характеристик над фрагментарним або мінімальним розкриттям.

Для кількісного узагальнення використано описову статистику: абсолютні частоти, частки у відсотках, ранжування індикаторів і індекс публічного екологічного розкриття (ІПЕР). ІПЕР розраховували як відношення кількості позитивно ідентифікованих індикаторів до максимально можливої кількості індикаторів у відповідній групі, помножене на 100 %. Через цільовий характер вибірки та обмежену кількість одиниць аналізу інферентні статистичні висновки щодо всього сектору HORECA не формулювалися; отримані частки використано для порівняльної, діагностичної та методичної інтерпретації. Методи дослідження також включали системний аналіз, порівняльний контент-аналіз, логічне узагальнення, побудову WBS-структури проєкту, розроблення матриці RACI, побудову матриці екологічних ризиків і формування системи KPI. Проєктна модель побудована відповідно до логіки PDCA, характерної для систем екологічного менеджменту, та адаптована до умов малих і середніх підприємств HORECA.

Результати

Проведений контент-аналіз показав, що публічне розкриття екологічних практик у HORECA має виражену нерівномірність як між сегментами, так і між окремими блоками екологічного менеджменту. Готельні групи частіше використовують корпоративні звіти, ESG-таблиці, підтвердження третьою стороною, сертифікаційні інструменти та кількісні показники. Ресторанні мережі частіше розкривають конкретні споживчо видимі практики: рослинні позиції в меню, скорочення пластику, відповідальне постачання окремих продуктів, цілі щодо викидів або відходів. Водночас ресторанний сектор менш стабільний за рівнем прозорості водоспоживання, харчових відходів і фактичних кількісних KPI.

Серед готельних груп усі проаналізовані одиниці мають окремі сторінки сталості або звітні матеріали. Accor декларує науково обґрунтований підхід до сталої гостинності, ціль скорочення вуглецевих викидів на 36 % і зменшення харчових відходів на 60 % до 2030 р. [5].

Hilton, Marriott та IHG мають окремі сторінки зі звітністю, performance tables, CDP-відповідями або ESG-матеріалами [6-8].

Radisson Hotel Group у звіті за 2024 р. підкреслює зниження викидів, енергетичного сліду, використання відновлюваної електроенергії, розвиток EV-інфраструктури та третинну верифікацію частини портфеля [9].

NH Hotels прямо вказує на критерії «green hotels», контроль вуглецевого сліду, енергії й води, локальне постачання, розділення відходів і заходи проти харчових втрат [11]. Hyatt у матеріалах щодо екологічної сталості виділяє клімат і воду, відходи та циркулярність, відповідальне постачання і захист локальних середовищ як фокусні напрями [12].

Отже, для готельної частини вибірки характерна вища інституціоналізація екологічного менеджменту. Це проявляється через корпоративні політики, звіти, сертифікації, цілі до 2030 р., незалежні підтвердження даних і деталізацію показників на рівні портфеля готелів. Водночас навіть у готельних групах не всі практики однаково прозоро розкриваються на рівні окремого об’єкта. З погляду проєктного управління це свідчить про потребу в локалізації корпоративних ESG-цілей у форматі конкретних проєктів готелю або готельно-ресторанного комплексу.

Для ресторанної частини вибірки використано відкриті результати Which?, у яких 22 мережі оцінювалися за блоками ресурсів і викидів, політик постачання, відходів і пластику, прозорості та цільових орієнтирів. За порогом 60% найвищі результати показали блоки «цілі» – 22 з 22 мереж, або 100%, та «відходи і пластик» – 19 з 22 мереж, або 86,4%.

Блок «ресурси і викиди» має 17 позитивних оцінок, або 77,3%. Найслабшими є «політики постачання» – 5 з 22 мереж, або 22,7%, і «прозорість та вибір споживача» – 7 з 22 мереж, або 31,8%. Середні значення категорій становили відповідно 69,2%, 52,0%, 71,9%, 44,5% і 84,5% [13] (табл. 2).

Кількісне узагальнення результатів показало, що середній індекс публічного екологічного розкриття для готельних груп становив 82,5% (33 позитивні ідентифікації

Таблиця 2

Узагальнені результати онлайн-контент-аналізу екологічних практик HORECA

Table 2

Generalized results of online content analysis of environmental practices in HORECA

Група	Індикатор	Кіль-кість	%	Інтерпретація
Готельні групи	Екологічна полі-тика / ESG-звіт	8/8	100,0	Наявність сторінок сталості, ESG/Responsible Business або performance матеріалів
Готельні групи	Енергоефектив-ність / кліматичні цілі	8/8	100,0	Вуглецеві цілі, energy footprint, відновлювана енергія, CDP або аналогічне розкриття
Готельні групи	Водозбереження / водний моніторинг	6/8	75,0	Вода розкрита не в усіх коротких вебматеріалах, частіше у звітах або додатках
Готельні групи	Відходи / харчові відходи	6/8	75,0	Найчастіше згадуються food waste, recycling, circularity або hazardous waste monitoring
Готельні групи	Сертифікація / зовнішня верифікація	5/8	62,5	Eco-label, Hotel Sustainability Basics, assurance statements, ISO/GRI/CDP практики
Ресторанні мережі	Ресурси та викиди	17/22	77,3	Категорія Which?: emissions data, water consumption, renewable energy
Ресторанні мережі	Політики поста-чання	5/22	22,7	Найслабший блок: харчова сировина, cleaning products, пластик і пакування
Ресторанні мережі	Відходи та пластик	19/22	86,4	Високий рівень декларування waste/plastics практик
Ресторанні мережі	Прозорість і вибір споживача	7/22	31,8	Обмежене розкриття інформації для клієнтів і неповна доступність даних
Ресторанні мережі	Цільові орієнтири	22/22	100,0	Усі мережі у вибірці мають певні targets за шкалою Which?

з 40 можливих за п'ятьма узагальненими блоками), тоді як для ресторанних мереж - 63,6% (70 позитивних ідентифікацій зі 110 можливих). Різниця між сегментами становить 18,9 відсоткового пункту і має діагностичний, а не репрезентативно-статистичний характер. Вона вказує на вищу формалізацію екологічного менеджменту у великих готельних групах та більшу фрагментарність онлайн-розкриття у ресторанному сегменті. Найсильнішими блоками є кліматично-енергетичні цілі, відходи, пластик і загальні цільові орієнтири. Найслабшими залишаються відповідальне постачання, прозорість для споживача, водоспоживання та кількісне розкриття харчових відходів.

Для проєктного підходу ключовим є те, що виявлені практики мають різний рівень зрілості: частина з них є політичними деклараціями або корпоративними цілями, частина – операційними процедурами, частина – вимірюваними KPI. Отже, EMS у HORECA не може бути впроваджена лише через загальну екологічну політику. Вона потребує структурування як проєкт із визначеними пакетами робіт, відповідальними особами, ресурсами, строками, ризиками, базовими показниками та контрольними точками моніторингу.

На основі узагальнення результатів контент-аналізу відкритих вебматеріалів підприємств готельно-ресторанного бізнесу та систематизації екологічних практик розроблено проєктну модель впровадження системи екологічного менеджменту в HORECA (табл. 3). Модель передбачає послідовний перехід від первинного екологічного аудиту до формування екологічної політики, планування проєктних заходів, розподілу відповідальності, впровадження операційних змін, моніторингу екологічних KPI та коригувальних дій (рис. 1).

Запропонована модель розглядає впровадження системи екологічного менеджменту не як одноразовий набір природоохоронних заходів, а як комплексний управ-

Таблиця 3

Проєктна модель впровадження системи екологічного менеджменту в HORECA

Table 3

Project model for implementing an environmental management system in HORECA

Етап	Зміст робіт	Проєктний результат
1. Ініціація	Рішення керівництва, призначення керівника проєкту, визначення меж EMS	Статут проєкту, команда, попередній перелік стейкхолдерів
2. Первинний екологічний аудит	Збір даних щодо енергії, води, відходів, пакування, постачання, хімії	Реєстр екологічних аспектів і базова лінія показників
3. Планування	Формування цілей, KPI, WBS, бюджету, графіка, ризиків і RACI	План управління проєктом впровадження EMS
4. Реалізація	Впровадження процедур сортування, енерго- і водоощадних заходів, закупівель, навчання	Запущені екологічні процедури та операційні інструкції
5. Моніторинг	Регулярний збір KPI, контроль виконання заходів, внутрішня звітність	Панель екологічних показників і звіт про відхилення
6. Внутрішній аудит	Перевірка процедур, інтерв'ю з персоналом, аналіз документів і фактичних даних	Акт внутрішнього аудиту та перелік невідповідностей
7. Коригувальні дії	Оновлення цілей, процедур, відповідальних і навчальних програм	План постійного поліпшення EMS



Рис. 1 – Логіка проєктного впровадження системи екологічного менеджменту в HORECA
Fig. 1 – Logic of project-based EMS implementation in HORECA

лінський проєкт. Його результативність залежить від узгодження екологічних цілей із ресурсами підприємства, участі персоналу, взаємодії з постачальниками, комунікації з клієнтами та регулярного вимірювання екологічних показників

Як видно з табл. 3, головною особливістю запропонованої моделі є інтеграція інструментів проєктного управління з екологічними індикаторами діяльності підприємства. На етапі ініціації визначаються екологічні проблеми та межі проєкту; на етапі планування формуються цілі, ресурси, відповідальні особи та очікувані екологічні результати; на етапі реалізації впроваджуються конкретні заходи щодо скорочення відходів, економії енергії й води, оптимізації пакування та постачання.

Завершальний етап передбачає моніторинг KPI, внутрішній аудит і коригувальні дії, що забезпечує безперервне поліпшення системи екологічного менеджменту.

Для практичного застосування запропонованої проєктної моделі необхідним є не лише визначення етапів впровадження EMS, а й ідентифікація ризиків, які можуть вплинути на досягнення екологічних цілей. Результати онлайн-контент-аналізу показали, що найбільш проблемними зонами для підприємств HORECA є недостатність кількісних даних, нерівномірність розкриття інформації про водоспоживання, харчові відходи, постачання та відповідальність на рівні окремого закладу. Тому в межах проєктного підходу доцільно передбачити ризик-менеджмент як окремий елемент EMS. Матрицю ризиків проєкту впровадження системи екологічного менеджменту в закладі HORECA подано в табл. 4.

Таблиця 4

Матриця ризиків проєкту впровадження EMS у закладі HORECA

Table 4

Risk matrix of the EMS implementation project in a HORECA establishment

Ризик	Ймовірність	Вплив	Заходи реагування
Недостатність вихідних даних щодо ресурсів і відходів	Висока	Високий	Запровадити журнали обліку, лічильники, відповідальних за щомісячний збір KPI
Опір персоналу новим процедурам	Висока	Середній	Провести короткі тренінги, інструктажі, візуальні підказки, систему мотивації
Формальний характер екологічної політики	Середня	Високий	Пов’язати політику з KPI, аудитом і відповідальністю керівників змін
Зростання витрат на екологічні матеріали або постачання	Середня	Середній	Порівняти альтернативи, впроваджувати поетапно, рахувати повну вартість життєвого циклу
Ненадійність локальних або екологічних постачальників	Середня	Середній	Сформувати пул альтернативних постачальників і мінімальні екологічні критерії
Недовіра гостей до green claims	Середня	Високий	Публікувати вимірювані дані, уникати greenwashing, використовувати верифіковані сертифікації
Відсутність бюджету на модернізацію	Висока	Високий	Розділити проєкт на швидкі маловитратні дії та капітальні заходи з окупністю

Як визначено з табл. 4, найкритичнішими ризиками проєкту EMS є недостатність вихідних даних щодо ресурсів і відходів, опір персоналу новим процедурам, формальний характер екологічної політики та відсутність бюджету на модернізацію. Ці ризики мають високий або середній рівень впливу, оскільки без достовірної базової інформації, підтримки персоналу та фінансового забезпечення екологічна політика може залишитися декларативною. Запропоновані заходи реагування спрямовані на перехід від формального впровадження EMS до операційного управління: запровадження обліку показників, навчання персоналу, поетапне фінансування, визначення відповідальних осіб і використання верифікованих екологічних тверджень. Таким чином, матриця ризиків виконує функцію інструменту попередження управлінських, організаційних і комунікаційних бар’єрів під час реалізації екологічного проєкту.

Оскільки впровадження EMS у HORECA розглядається як управлінський проєкт, його результативність має оцінюватися за системою вимірюваних показників. KPI необхідні для порівняння базового стану підприємства з результатами після впровадження екологічних заходів, контролю виконання плану, виявлення відхилень і прийняття коригувальних рішень. З урахуванням екологічних аспектів, виявлених під час онлайн-контент-аналізу, запропоновано систему KPI для оцінювання результативності проєкту EMS, наведену в табл. 5.

Запропонована система KPI охоплює ключові екологічні аспекти діяльності закладу HORECA: відходи, харчові втрати, енергоспоживання, водоспоживання, пакування, постачання, навчання персоналу, виконання екологічного плану та комунікацію з клієнтами. На відміну від загальних декларацій про сталість, такі показники дозволя-

Таблиця 5

Система KPI для оцінювання результативності проєкту EMS

Table 5

KPI system for evaluating the EMS project performance

Напрям	KPI	Одиниця виміру	Періодичність
Відходи	Частка відсортованих відходів	% від загального обсягу	Щомісяця
Харчові відходи	Обсяг харчових відходів на одного гостя	кг/гість	Щотижня / щомісяця
Енергія	Споживання електроенергії на 1 гостьо-день або 1 посадкове місце	кВт·год/од.	Щомісяця
Вода	Споживання води на одного гостя або номеро-добу	л/гість; л/номеро-доба	Щомісяця
Пакування	Частка одноразового пластику в закупівлях	%	Щокварталу
Постачання	Частка локальних або відповідальних постачальників	%	Щокварталу
Персонал	Частка персоналу, що пройшов екологічний інструктаж	%	Щокварталу
Управління	Частка виконаних заходів екологічного плану	%	Щомісяця
Комунікація	Кількість публічних повідомлень або оновлень щодо екологічних практик	од.	Щокварталу

ють кількісно оцінити фактичну результативність проєкту EMS. Найбільш оперативними є щотижневі та щомісячні KPI щодо харчових відходів, енергії, води й виконання заходів екологічного плану. Щоквартальні показники доцільно застосовувати для оцінювання постачання, пакування, навчання персоналу та зовнішньої комунікації. Така періодичність забезпечує баланс між регулярним контролем і реалістичним адміністративним навантаженням для підприємств готельно-ресторанного бізнесу.

Обговорення

Отримані результати підтверджують доцільність розгляду системи екологічного менеджменту в готельно-ресторанному бізнесі не лише як сукупності природоохоронних заходів, а як керованої організаційної зміни, що узгоджується з міжнародною логікою екологічного менеджменту, відповідно до якої організація має визначати істотні екологічні аспекти, формувати цілі, розподіляти відповідальність, здійснювати моніторинг показників і забезпечувати постійне поліпшення [1; 2]. Таким чином проєктний підхід виконує інтегрувальну функцію: він переводить екологічні наміри підприємства з рівня загальної політики на рівень конкретних робіт, строків, відповідальних осіб, ресурсів, ризиків і вимірюваних результатів.

Для підприємств HORECA така логіка має особливе значення через складність і багатокомпонентність операційних процесів. Один заклад одночасно управляє кухнею, залом, номерами, пральнею, закупівлями, складом, логістикою, клінінгом, сервісними комунікаціями та взаємодією з гостями. Кожен із цих процесів формує власні екологічні аспекти: споживання енергії й води, утворення харчових і пакувальних відходів, використання мийних засобів, вибір постачальників, поводження з одноразовими матеріалами, комунікацію екологічних практик клієнтам. Тому впровадження EMS у готелі, ресторані або готельно-ресторанному комплексі не може бути зведене до одного управлінського рішення чи окремої екологічної акції. Воно потребує портфеля взаємопов'язаних дій, які мають бути сплановані, скоординовані та проконтрольовані.

Результати онлайн-контент-аналізу засвідчили різний рівень зрілості екологічного менеджменту в готельному та ресторанному

сегментах вибірки. Великі корпоративні готельні групи значною мірою рухаються в напрямі формалізованої екологічної звітності: Accor, Marriott, Hilton, IHG, Radisson, Scandic, NH Hotels і Hyatt публічно представляють звіти, цілі, політики або інструменти сталості [5–12]. Це свідчить про інституціоналізацію екологічного менеджменту на корпоративному рівні. Але навіть за наявності ESG-звітів і загальних стратегічних цілей залишається проблема локалізації цих цілей на рівні конкретного готелю, ресторану або готельно-ресторанного комплексу. Тому проєктна модель EMS може виконувати прикладну функцію: перетворювати корпоративні екологічні орієнтири на конкретний план дій окремого закладу.

Ресторанна частина вибірки демонструє іншу управлінську проблему: наявність цільових орієнтирів не гарантує повноти, прозорості та регулярності екологічних даних. У дослідженні Which? усі проаналізовані ресторанні мережі мали певні цілі, однак блоки прозорості, споживчого вибору та політик постачання отримали нижчі оцінки [13]. Це означає, що для ресторанного бізнесу впровадження EMS має охоплювати не лише внутрішні екологічні процедури, а й управління даними: які показники збираються, з якою періодичністю, хто відповідає за їхню достовірність, які результати комунікуються споживачам і як запобігається ризик greenwashing. Без такого компонента екологічна політика може залишатися декларативною, а її результативність – недостатньо доказовою.

Запропонована проєктна модель EMS дає змогу подолати фрагментарність екологічних практик, яка є типовою для багатьох підприємств HORECA. Окреме сортування відходів, заміна пакування, встановлення енергоощадного обладнання або використання локальних продуктів можуть мати позитивний ефект, але без єдиної системи цілей, відповідальності та моніторингу ці заходи не формують повноцінної системи екологічного менеджменту. Проєктний підхід поєднує такі дії в послідовний управлінський цикл: ініціація – екологічний аудит – планування – реалізація – моніторинг – внутрішній аудит – коригувальні дії. Саме ця послідовність забезпечує зв'язок між виявленими екологічними аспектами, управлінськими рішеннями та вимірюваними результатами.

Важливою умовою результативності EMS є поєднання проєктної моделі з матрицею ризиків і системою KPI. Матриця ризиків дозволяє заздалегідь визначити чинники, які можуть ускладнити впровадження екологічного менеджменту: нестачу вихідних даних, опір персоналу, формальний характер екологічної політики, обмеженість бюджету, ненадійність постачальників або недовіру гостей до екологічних тверджень. Система KPI, своєю чергою, забезпечує кількісну перевірку результативності проєкту за основними напрямами: відходи, харчові втрати, енергія, вода, пакування, постачання, навчання персоналу, виконання екологічного плану та комунікація. У сукупності ці інструменти переводять EMS із площини загальних намірів у площину регулярного управлінського контролю.

Запропонований підхід може бути адаптований до підприємств різного масштабу. Для великих мережевих підприємств він може використовуватися як інструмент локалізації корпоративної ESG-стратегії на рівні окремого об'єкта.

Для незалежних ресторанів, кафе, малих готелів і готельно-ресторанних комплексів він може виконувати функцію спрощеної дорожньої карти впровадження базового екологічного менеджменту без надмірного адміністративного навантаження. У цьому випадку доцільно починати з обмеженої кількості найбільш істотних екологічних аспектів – наприклад, відходів, води, енергії, пакування, постачання та навчання персоналу – з подальшим розширенням системи після накопичення даних і управлінського досвіду.

Обмеженням дослідження є те, що онлайн-контент-аналіз відображає рівень публічного розкриття екологічних практик, а не повний фактичний стан їх упровадження на місці.

Вебсторінки, ESG-звіти та рейтинги дозволяють оцінити відкритість, структурованість і комунікаційну зрілість екологічного менеджменту, однак не замінюють внутрішнього аудиту, аналізу первинних даних підприємства або інструментальних вимірювань. Невипадковий характер вибірки обмежує можливість прямого поширення отриманих часток на весь сектор HORECA.

Результати слід розглядати як діагностичні показники типових прогалин публічного екологічного розкриття та як підставу для побудови проєктної моделі EMS, що потребує подальшої апробації на рівні конкретних підприємств.

Висновки

Готельно-ресторанний бізнес має комплексний екологічний профіль, який охоплює енерго- і водоспоживання, харчові та пакувальні відходи, хімічні засоби, постачання, сервісну поведінку персоналу й гостей. Це підтверджує, що EMS у HORECA доцільно впроваджувати не як набір ізольованих природоохоронних заходів, а як цілісний управлінський проєкт, інтегрований у щоденні операційні процеси.

Онлайн-контент-аналіз 30 відкритих джерел засвідчив нерівномірність публічного розкриття екологічних практик. За узагальненим індексом публічного екологічного розкриття готельні групи досягли 82,5%, ресторанні мережі – 63,6%. Це свідчить про вищу інституціоналізацію EMS у готельному сегменті та більшу фрагментарність екологічної звітності у ресторанному бізнесі. Найбільш розкритими є енергетично-кліматичні цілі, відходи, пластик і загальні targets; найслабшими - відповідальне постачання, прозорість для споживача, водоспоживання та кількісне розкриття харчових відходів.

Розроблена проєктна модель EMS включає сім етапів: ініціацію, первинний екологічний аудит, планування, реалізацію, моніторинг, внутрішній аудит і коригувальні дії. Така структура відповідає циклу постійного поліпшення та дозволяє перетворити екологічні наміри підприємства на вимірювану систему робіт, відповідальності, ризиків, ресурсів і результатів.

Запропоновані матриця ризиків і система KPI створюють інструментарій для практичного управління екологічним проєктом у готелі, ресторані або готельно-ресторанному комплексі. Найбільш критичними умовами успіху є наявність базових даних, підтримка керівництва, залучення персоналу, простота процедур, регулярний моніторинг і достовірна комунікація з клієнтами. Практичне значення моделі полягає у можливості перейти від фрагментарних «зелених» ініціатив до доказового управління екологічною результативністю.

Межі узагальнення результатів визначаються цільовим характером вибірки та використанням відкритих онлайн-джерел. Тому подальші дослідження доцільно спрямувати на апробацію запропонованої моделі на фактичних даних окремих підприємств HORECA, порівняння результатів до і після впровадження EMS, а також статистичну перевірку зв'язку між екологічними практиками, ресурсоефективністю та економічними показниками закладів.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису немає. Крім того, автор повністю дотримувався етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Декларація про використання ШІ

Автор використовував ChatGPT-5.5 (OpenAI, 2026) виключно для мовного редагування, структурного впорядкування тексту. Весь науковий контент, матеріали та висновки були створені авторами. Усі наукові положення, інтерпретації, результати та висновки критично перевірені авторами, які несуть повну відповідальність за зміст рукопису.

Список використаної літератури

1. ISO 14001:2026. Environmental management systems - Requirements with guidance for use. International Organization for Standardization. URL: https://www.iso.org/standard/14001
2. EPA. EMS Under ISO 14001. United States Environmental Protection Agency. URL: https://www.epa.gov/ems/ems-under-iso-14001
3. European Commission. EU Ecolabel Tourist Accommodation. URL: https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy-topics/eu-ecolabel/eu-ecolabel-tourist-accommodation_en
4. Green Key. The leading standard for excellence in environmental responsibility and sustainable operation. URL: https://www.greenkey.global/
5. Accor Group. Sustainable Hospitality. URL: https://group.accor.com/en/group/sustainable-hospitality
6. Hilton. Travel with Purpose: Our Reporting. URL: https://travelwithpurpose.hilton.com/our-reporting/
7. Marriott International. Serve 360: Sustainability & Social Impact Reports and Highlights. URL: https://serve360.marriott.com/sustainable-goals/

8. InterContinental Hotels Group. Responsible Business Reporting. URL: https://www.ihgplc.com/en/responsible-business/reporting
9. Radisson Hotel Group publishes its Sustainability Report 2024. URL: https://www.radissonhotels.com/en-us/corporate/media/press-releases/Radisson-Hotel-Group-publishes-its-Sustainability-Report-2024
10. Scandic Hotels Group. Scandic's Annual and Sustainability Report for 2025 is being published today. URL: https://www.scandichotelsgroup.com/media/press-releases/2026/scandics-annual-and-sustainability-report-for-2025-is-being-published-today/
11. NH Hotel Group. Discover our green hotels around the world. URL: https://www.nh-hotels.com/en/environment/ecological-sustainable-hotels
12. Hyatt. Environmental Sustainability. URL: https://assets.hyatt.com/content/dam/hyatt/hyattdam/documents/2025/11/10/1644/HYCOM-Environmental-Sustainability-101025.pdf
13. Which? Most sustainable UK restaurant chains revealed. URL: https://www.which.co.uk/news/article/most-sustainable-uk-restaurant-chains-revealed-aVio22t7pseq
14. Wahaca. Sustainability at Wahaca. URL: https://www.wahaca.co.uk/sustainability/
15. McDonald's Corporation. Purpose & Impact Report 2024-2025. URL: https://corporate.mcdonalds.com/content/dam/sites/corp/nfl/pdf/McDonalds_PurposeImpact_ProgressReport_2024_2025.pdf
16. Starbucks. Sustainability: Giving more than we take. URL: https://about.starbucks.com/stories/category/people-impact/sustainability/
17. Environmental Sustainability in Hotels: A Review of the Relevance and Contributions of Assessment Tools and Techniques. Administrative Sciences. 2024. Vol. 14, No. 12. Article 320. https://doi.org/10.3390/admsci14120320
18. The Role of Environmental Certification in the Hospitality Industry. Sustainability. 2025. Vol. 17, No. 2. Article 650. https://doi.org/10.3390/su17020650
19. A Systematic Informetric Analysis and Literature Review of Food Waste in the Food Service Industry. Sustainability. 2025. Vol. 17, No. 1. Article 103. DOI: https://doi.org/10.3390/su17010103
20. UNEP. Food Waste Index Report 2024. URL: https://www.unep.org/resources/publication/food-waste-index-report-2024
21. UN Tourism. Sustainable Tourism Initiatives. URL: https://www.untourism.int/sustainable-development/tourism-initiatives
22. Zero Waste Alliance Ukraine. "Зелені Ідеї Zero Waste & Climate Friendly в HORECA: Українські Бізнеси". URL: https://zerowaste.org.ua/2023/09/25/posibnyk-zeleni-ideyi-v-horeca-ukrayinski-biznesy/

Стаття надійшла до редакції 18.04.2026 Переглянуто 18.05.2026
Стаття рекомендована до друку 20.05.2026 Опубліковано 30.05.2026

V. L. BEZSONNYI, DSc (Technics),
Professor of the Department of Hotel, Restaurant Business and Craft Technologies
e-mail: vitalii.bezsonnyi@hneu.net ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-8089-7724

Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics,
9a, Nauky Ave., Kharkiv, 61165, Ukraine

PROJECT-BASED APPROACH TO THE IMPLEMENTATION AND PERFORMANCE EVALUATION OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT IN THE HOTEL AND RESTAURANT BUSINESS

Purpose. To substantiate a project-based approach to implementing an environmental management system in the hotel and restaurant business and to develop an applied model that combines environmental audit, work planning, stakeholder management, risk assessment and environmental performance indicators.

Methods. The study applies systems analysis, online content analysis of open web sources, comparative analysis, project modelling, WBS structuring, RACI logic, risk matrix and KPI analysis.

Results. The empirical basis consists of 30 open online sources: 8 corporate sustainability or reporting pages of hotel groups operating in the European market and 22 restaurant chains represented in an open sustainability ranking. The sample is purposive; therefore, the findings are interpreted as indicators of public environmental

disclosure rather than statistically representative evidence for the whole HORECA sector. Frequencies, percentages, ranking of indicators and the public environmental disclosure index were used for quantitative generalization.The results show that energy and climate goals, waste and plastic practices and general targets are the most visible components of public disclosure. Weaker areas include transparency of water consumption, quantitative disclosure of food waste, responsible sourcing and localization of responsibility at the level of individual establishments. The generalized public environmental disclosure index reached 82.5% for hotel groups and 63.6% for restaurant chains, indicating a higher institutionalization of environmental management in the hotel segment. A project model of EMS implementation was developed, including initiation, environmental audit, planning, implementation, monitoring, internal audit and corrective actions.

Conclusions. The implementation of an EMS in HORECA should be organized as a project with clear phases, responsibilities, risks and KPIs. The proposed model enables hospitality enterprises to move from fragmented green initiatives to systematic environmental performance management and can be used in professional education related to project management in the hotel and restaurant business. The scope of generalization is limited by the purposive sample and the use of open online sources.

KEY WORDS: *environmental management, project management, hotel and restaurant business, resource efficiency, waste, sustainable development*

Conflict of Interest

The author declares no conflict of interest regarding the publication of this manuscript. Furthermore, the author has fully adhered to ethical norms, including avoiding plagiarism, data falsification, and duplicate publication.

AI Statement

The author used ChatGPT-5.5 (OpenAI, 2026) exclusively for language editing, structural organization of the text. All scientific content, materials and conclusions were created by the authors. All scientific statements, interpretations, results and conclusions have been critically reviewed by the authors, who bear full responsibility for the content of the manuscript.

References

1. International Organization for Standardization. (2026). ISO 14001:2026. Environmental management systems - Requirements with guidance for use. Retrieved from https://www.iso.org/standard/14001
2. United States Environmental Protection Agency. (2026). EMS under ISO 14001. Retrieved from https://www.epa.gov/ems/ems-under-iso-14001
3. European Commission. (2026). EU Ecolabel tourist accommodation. Retrieved from https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy-topics/eu-ecolabel/eu-ecolabel-tourist-accommodation_en
4. Green Key. (2026). The leading standard for excellence in environmental responsibility and sustainable operation. Retrieved from https://www.greenkey.global/
5. Accor Group. (2026). Sustainable hospitality. Retrieved from https://group.accor.com/en/group/sustainable-hospitality
6. Hilton. (2025). Travel with Purpose: Our reporting. Retrieved from https://travelwithpurpose.hilton.com/our-reporting/
7. Marriott International. (2025). Serve 360: Sustainability and social impact reports and highlights. Retrieved from https://serve360.marriott.com/sustainable-goals/
8. InterContinental Hotels Group. (2026). Responsible business reporting. Retrieved from https://www.ihg-plc.com/en/responsible-business/reporting
9. Radisson Hotel Group. (2025). Radisson Hotel Group publishes its Sustainability Report 2024. Retrieved from https://www.radissonhotels.com/en-us/corporate/media/press-releases/Radisson-Hotel-Group-publishes-its-Sustainability-Report-2024
10. Scandic Hotels Group. (2026). Scandic's annual and sustainability report for 2025 is being published today. Retrieved from https://www.scandichotelsgroup.com/media/press-releases/2026/scandics-annual-and-sustainability-report-for-2025-is-being-published-today/
11. NH Hotel Group. (2026). Discover our green hotels around the world. Retrieved from https://www.nh-hotels.com/en/environment/ecological-sustainable-hotels
12. Hyatt. (2025). Environmental sustainability. Retrieved from https://assets.hyatt.com/content/dam/hyatt/hyattdam/documents/2025/11/10/1644/HYCOM-Environmental-Sustainability-101025.pdf
13. Which? (2024). Most sustainable UK restaurant chains revealed. Retrieved from https://www.which.co.uk/news/article/most-sustainable-uk-restaurant-chains-revealed-aVio22t7pseq
14. Wahaca. (2026). Sustainability at Wahaca. Retrieved from https://www.wahaca.co.uk/sustainability/

15. McDonald's Corporation. (2025). Purpose & impact report 2024-2025. Retrieved from https://corporate.mcdonalds.com/content/dam/sites/corp/nfl/pdf/McDonalds_PurposeImpact_ProgressReport_2024_2025.pdf
16. Starbucks. (2026). Sustainability: Giving more than we take. Retrieved from https://about.starbucks.com/stories/category/people-impact/sustainability/
17. Environmental sustainability in hotels: A review of the relevance and contributions of assessment tools and techniques. (2024). *Administrative Sciences*, 14(12), 320. https://doi.org/10.3390/admsci14120320
18. The role of environmental certification in the hospitality industry. (2025). *Sustainability*, 17(2), 650. https://doi.org/10.3390/su17020650
19. A systematic informetric analysis and literature review of food waste in the food service industry. (2025). *Sustainability*, 17(1), 103. https://doi.org/10.3390/su17010103
20. United Nations Environment Programme. (2024). Food Waste Index Report 2024. Retrieved from https://www.unep.org/resources/publication/food-waste-index-report-2024
21. UN Tourism. (2026). Sustainable tourism initiatives. Retrieved from https://www.untourism.int/sustainable-development/tourism-initiatives
22. Zero Waste Alliance Ukraine. (2023). Green Ideas of Zero Waste & Climate Friendly in HORECA: Ukrainian Businesses. Retrieved from https://zerowaste.org.ua/2023/09/25/posibnyk-zeleni-ideyi-v-horeca-ukrayinski-biznesy/

The article was received by the editors 18.04.2026 The article was revised 18.05.2026
The article is recommended for printing 20.05.2026 This article published 30.05.2026

https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-14
UDC 613.2:664.95:635.62:504.06

O. Yu. DAVYDOVA, DSc (Economy), Prof.,
Head of the Department of Hotel, Restaurant Business and Craft Technologies
e-mail: davydova_oks@ukr.net ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-3045-9464
Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics
9a, Nauky Ave., Kharkiv, 61165, Ukraine

ECOLOGICAL AND NUTRITIONAL JUSTIFICATION OF RECIPE COMPONENTS FOR A NEW TECHNOLOGY OF MINCED FISH PRODUCTS

Purpose. To substantiate the use of pumpkin puree as a local vegetable raw material in the technology of minced fish products from the perspective of human ecology, sustainable nutrition, food safety, and resource-oriented restaurant production.

Methods. The study used an analytical review of current literature on sustainable healthy diets, dietary fiber, bioactive components of pumpkin and quality of fish products; normative analysis of raw material requirements; technological modelling of the formulation; calculated assessment of nutritional and energy value; descriptive organoleptic assessment of the experimental sample; and interpretation of microbiological indicators of the finished dish. Traditional fish patties without pumpkin puree were considered as a recipe prototype; however, quantitative experimental comparison with a control sample was not performed due to the lack of repeated primary measurements.

Results. The addition of pumpkin puree to the formulation of minced fish products had technological, nutritional, and preliminary Ecological significance. It increased the share of a locally available plant component, formed natural colour, supported juiciness and soft texture, and supplemented the fish protein base with dietary fibre, pectin substances, and carotenoids. According to calculated data for fish patties with pumpkin without potato garnish, 100 g of product contained 4.06 g of protein, 9.80 g of fat, 0.98 g of carbohydrates, and 105.73 kcal. The experimental sample had an even surface, an orange shade, homogeneous tender consistency, and a characteristic fish taste with a moderate sweet pumpkin aftertaste. Microbiological indicators did not exceed established limits; pathogenic microorganisms, including Salmonella spp., were not detected in 25 g of product.

Conclusions. The developed recipe and technological model can be considered a preliminary substantiated direction for ecological and nutritional improvement of minced fish products. Its ecological interpretation is based on the local origin of the vegetable raw material, the combination of animal and plant components, and the use of gentle heat treatment. Further validation requires control experiments, statistically confirmed sensory assessment, instrumental determination of quality indicators, and quantitative life-cycle-based environmental assessment.

KEY WORDS: *human ecology, sustainable nutrition, fish products, pumpkin, dietary fiber, food safety*

Як цитувати: Davydova O. Yu. Ecological and nutritional justification of recipe components for a new technology of minced fish products. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2026. Вип. 34. С. 181-189. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-14

In cites: Davydova, O. Yu. (2026). Ecological and nutritional justification of recipe components for a new technology of minced fish products. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology,* (34), 181-189. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-14

Introduction

Nutrition is one of the leading determinants of population health; therefore, current research in human ecology increasingly considers a food product not only as an object of technology but also as an element of the “environment – food raw material – diet – health” system. Within this approach, nutritional value, biological value, safety, raw-material accessibility, local origin, energy efficiency of technological processes, and the potential to reduce excessive resource use in food production are important. The concept of sustainable healthy diets combines nutritional adequacy with minimization of the negative environmental impact of food systems and with consideration of the socio-cultural acceptability of products [1].

© Davydova O. Yu., 2026

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0

According to WHO recommendations, the diet of individuals older than 10 years should include at least 400 g of fruit and vegetables per day and at least 25 g of naturally occurring dietary fibre [2]. At the same time, actual consumer diets often remain deficient in plant raw materials, dietary fibre, and products containing natural biologically active substances. This makes it relevant to develop dishes in which an animal protein base is combined with local plant components that can increase the biological value of the product without complicating the technology.

Fish raw material has high biological value owing to complete protein, minerals, and the lipid fraction. However, the current development of aquatic food systems requires careful and rational use of fish resources, the creation of products with high added value, and the integration of fish products into healthy diets [3]. A promising direction is the combination of a fish base with plant raw materials that can perform technological, sensory, and nutritional functions.

Pumpkin is a plant raw material widely cultivated in Ukraine and available at a relatively low cost. It contains dietary fibre, pectin substances, vitamins, carotenoids, polyphenols, mineral elements, and other biologically active substances. Current reviews highlight the potential of pumpkin for creating new functional foods and for implementing circular-economy approaches in food production [4, 5]. Dietary fibre supplied by plant raw materials affects the intestinal microbiota, metabolic processes, and the risks of non-communicable diseases, thereby forming the medical and ecological context of the study [6, 7].

A separate condition for the practical implementation of such products is their sensory acceptability. Modern sensory science regards organoleptic properties as a key link between the technological parameters of a product, consumer expectations, and actual food choice [8-10]. Therefore, when developing combined fish-and-plant products, it is necessary to evaluate the recipe composition, technological feasibility, quality, safety, and ecological interpretation of raw-material use simultaneously.

An unresolved issue remains the scientific substantiation of the use of pumpkin puree in minced fish systems specifically from the perspectives of human ecology and sustainable nutrition. Most existing studies primarily emphasize technological or culinary advantages, whereas ecologically and nutritionally oriented research requires demonstrating the relationship between the selection of raw materials, their safety, nutritional value, and the environmentally oriented organization of nutrition.

The purpose of this study is to provide ecological and nutritional justification for the use of pumpkin puree as a local vegetable raw material in the technology of minced fish products in order to increase the nutritional value, sensory quality, and safety of the finished dish in the context of sustainable nutrition.

To achieve this purpose, the following tasks were set: to substantiate the choice of fish and vegetable raw materials; to develop a recipe model for the dish “Fish patties with pumpkin”; to evaluate the organoleptic properties of the experimental sample; to determine calculated indicators of nutritional and energy value; to interpret the microbiological indicators of the finished product; and to identify directions for further ecological validation of the technology.

Objects and Methods of the Study

The object of the study is the production technology of minced fish products with the use of pumpkin puree. The subject of the study is the recipe composition, technological operations, organoleptic properties, calculated indicators of nutritional value, and microbiological safety of the finished dish. The experimental sample is the recipe model “Fish patties with pumpkin”. Traditional fish patties without pumpkin puree were considered as the control recipe prototype.

The methodological scheme of the study included: 1) analysis of current sources on sustainable nutrition, dietary fibre, biologically active substances of pumpkin, the quality of fish products, and sensory evaluation; 2) normative substantiation of the choice of raw materials; 3) formulation development; 4) calculation of nutritional and energy value; 5) descriptive organoleptic evaluation; and 6) analysis of microbiological compliance of the finished product. The approach corresponds to the principles of combining traditional and ecologically oriented analytical procedures in food science [11] (fig. 1).

Pike perch, bulb onion, pork back fat, garlic, pumpkin, table salt, ground black pepper, and butter were used to produce the experimental samples. Raw-material quality was



Fig. 1 – Conceptual scheme of ecological and nutritional justification for using pumpkin puree in minced fish products

assessed according to current normative documents, in particular those regulating live fish, pumpkin, salt, pepper, and butter [12-16] (table 1). Pumpkin puree was prepared by peeling the pumpkin, cutting the pulp into cubes, steaming it until softened, and grinding it to a homogeneous consistency. Steaming was selected as a gentler method of vegetable raw-material preparation compared with intensive frying. Organoleptic evaluation was carried out according to a descriptive scheme that considered appearance, colour, consistency, aroma, and taste. The results of organoleptic evaluation were interpreted as a descriptive profile of the experimental sample. For further validation, sensory evaluation of samples produced in several batches is planned using a scoring scale followed by calculation of mean values and confidence intervals.

The nutritional and energy value was determined by a calculation method based on the recipe composition. The calculation was performed for fish patties with pumpkin. Microbiological indicators of the finished product were interpreted using the data provided in the source materials on the number of mesophilic aerobic and facultative anaerobic microorganisms, coliform bacteria, Escherichia coli, Staphylococcus aureus, Proteus, and pathogenic microorganisms, including Salmonella spp.

Table 1

Normative characteristics of the main raw materials for the experimental sample

Raw material	Normative document	Key quality and safety indicators
Pike perch	DSTU 2284:2010	Fresh fish with clean scales, clear eyes, red gills, elastic muscles, and a characteristic odour without foreign signs.
Pumpkin	DSTU 3190-95	Fresh, whole, clean, mature fruits without damage or foreign odour, with typical colouring and a moderately sweet taste.
Auxiliary raw materials	DSTU 3234-95; DSTU 3233-95; DSTU 3583:2015; DSTU ISO 959-1:2008; DSTU 4399:2005	Compliance with organoleptic and physicochemical requirements of normative documents; absence of foreign impurities, signs of spoilage, and uncharacteristic odour.

The ecological interpretation was performed at the level of qualitative analysis and included the locality and determination of environmentally safe cultivation conditions for plant raw materials, the combination of animal- and plant-based ingredients, the use of gentle heat-treatment methods, and the potential for reducing the proportion of ingredients associated with higher resource intensity.

Results of the Study

The recipe model was formed according to the principle of combining a lean fish base with a vegetable component that functions as a natural structure-forming agent, a source of biologically active substances and dietary fibre, and a sensory modifier. Pike perch is the main protein component. Pumpkin puree was introduced as a local vegetable additive capable of

modifying the colour, consistency, and nutritional profile of the product (table 2).

From an ecological perspective, the use of pumpkin offers several advantages: the raw material is widely cultivated in Ukraine, demonstrates good storage stability, does not require complex preliminary processing operations, can be used seasonally or after short-term storage, and contributes to increasing the proportion of plant-based components in the dish. Such an approach is consistent with the modern perception of pumpkin as a crop cultivated under environmentally safe conditions that is important for food and nutritional security [17], as well as with applied studies on the use of plant raw materials in food technologies [18, 19].

The technological process includes preparation of fish fillet and vegetable raw materials, preparation of pumpkin puree, grinding of components, formation of the minced mass system, portioning, shaping of products, poaching, addition of butter, and service with a garnish. In the new technology, pumpkin puree has a dual effect: it acts as a structure-forming component of the mince and increases the proportion of plant raw material in the dish, enriching the final product with biologically active substances. This makes it possible to obtain a new product of enhanced biological value and high organoleptic quality.

Table 2

Recipe composition of the experimental dish "Fish patties with pumpkin"

Raw material	Gross, g	Net, g
Pike perch	115	55
Bulb onion	5	4
Pork back fat	20.8	20
Garlic	1.3	1
Pumpkin	30	20
Table salt	1.3	1
Ground black pepper	1.3	1
Semi-finished product mass	-	102
Finished patties mass	-	112
Garnish: mashed potatoes	-	150
Butter	10	10
Yield of the complete dish	-	272

The organoleptic indicators of the developed product show that pumpkin puree not only enriches the recipe with a plant component but also affects the visual and textural properties of the product. The most noticeable effect is the formation of a natural light-orange color, which increases the visual attractiveness of the dish (tab.3).

The indicators of nutritional and energy value are presented in Table 4. Pike perch is the main source of protein in the developed product; the fat fraction is formed mainly by pork back fat and butter; and pumpkin provides the addition of a plant component, dietary fibre, vitamins, and polyphenolic substances.

Table 3

Organoleptic profile of the experimental sample

Indicator	Characteristic
Appearance	The products have an even surface and retain a rounded shape; they are served with butter.
Colour	A light-orange or orange shade caused by the addition of pumpkin puree.
Consistency	Tender, soft, and homogeneous; the product retains its shape when cut.
Aroma	Characteristic fish aroma with light vegetable and spicy notes.
Taste	Taste of the fish base with a moderate sweet pumpkin aftertaste.

Table 4

Nutritional and energy value of fish patties with pumpkin per 100 g of product

Raw material	Water, g	Protein, g	Fat, g	Sugars, g	Starch, g	Dietary fibre, g	Ash, g	Energy value, kcal (kJ)
Pike perch	15.95	3.72	0.22	0.00	0.00	0.00	0.24	16.78 (70.23)
Bulb onion	1.26	0.02	0.00	0.07	0.01	0.02	0.01	0.60 (2.51)
Pork back fat	0.42	0.18	6.54	0.00	0.00	0.00	0.01	58.60 (245.34)
Garlic	0.21	0.02	0.00	0.00	0.09	0.01	0.01	0.53 (2.22)
Pumpkin	6.74	0.10	0.01	0.15	0.07	0.09	0.04	1.62 (6.78)
Table salt	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.37	0.00 (0.00)
Ground black pepper	0.34	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.10 (0.42)
Butter	0.58	0.02	3.03	0.03	0.00	0.00	0.01	27.50 (115.06)
Total	25.50	4.06	9.80	0.27	0.17	0.12	0.69	105.73 (442.57)

The microbiological analysis demonstrated that the number of mesophilic aerobic and facultative anaerobic microorganisms in the finished product was 1×10^3 CFU/g. Coliform bacteria, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Proteus* spp., and pathogenic microorganisms, including *Salmonella* spp., were not detected within the established sample masses. These results indicate that the experimental batch complied with the basic microbiological safety requirements, provided that appropriate sanitary and hygienic conditions during production and serving were maintained.

Discussion

The obtained results confirm that the addition of pumpkin puree to minced fish mass has a complex effect. At the technological level, pumpkin puree acts as a component that improves water-holding capacity and contributes to the formation of a tender consistency. At the sensory level, it provides natural colouring and a moderate sweet taste that does not conflict with the flavour of the fish base. At the nutritional level, pumpkin increases the biological value of the final product by supplementing the formulation with dietary fibre, pectins, and carotenoids, which is consistent with current evidence on the functional potential of pumpkin raw materials [4, 5, 17].

From the perspective of human ecology, the key consideration is not the absolute increase in a single nutrient, but rather the trajectory of recipe modification through the combination of a complete protein base with locally sourced plant raw materials under the application of gentle technological processing regimes. Such an approach is consistent with the concept of sustainable nutrition, according to which a food product should simultaneously be safe, nutritionally adequate, consumer acceptable, and resource-efficient [1, 2].

The practical significance of the results lies in the possibility of adapting the dish for restaurant enterprises that develop menus based on local ingredients, functional products, and more sustainable technological solutions. The use of pumpkin as an accessible plant raw material can be combined with current trends in gastronomy, emotional attractiveness of dishes, and the creation of competitive restaurant products [20, 21]. Consumer survey data on the orientation toward healthy eating also support the relevance of this direction [22-24].

Compared with traditional production technology, the emphasis of the developed technology for minced fish products with pumpkin is shifted from general restaurant innovation to ecological and nutritional justification.

Conclusions

The ecological and nutritional significance of the study was clarified: the use of pumpkin puree in minced fish products was substantiated as a means of combining a protein-rich fish base with locally sourced environmentally safe plant raw materials possessing technological, sensory, and potential ecological value.

The developed recipe model for the dish “Fish patties with pumpkin” involves the addition of 20 g net pumpkin puree per portion. This pro-

vides a natural light-orange colour, a soft homogeneous consistency, and a moderate pumpkin aftertaste without losing the character of the fish base.

The nutritional and energy value of the developed fish patties with pumpkin was determined. A 100 g portion of product contains 4.06 g of protein, 9.80 g of fat, and 0.98 g of carbohydrates, with an energy value of 105.73 kcal.

The microbiological indicators of the experimental batch did not exceed established limits: pathogenic microorganisms, including Salmonella spp., were not detected in 25 g of product. This confirms the possibility of safe production of the dish, provided that sanitary and hygienic requirements for production and sale are observed.

The proposed recipe model may be considered a preliminarily substantiated direction for the ecological and nutritional improvement of minced fish products.

Further scientific research will be aimed at comprehensive verification of the ecological advantages of the proposed product, identification of pathways and opportunities for obtaining certified environmentally safe raw materials, statistical processing of sensory and physicochemical indicators, and quantitative assessment of the environmental footprint using life-cycle-based ecological and technological methodologies. Such assessment will encompass different stages of the product life cycle, including production processes, preservation and storage under specified conditions, as well as packaging disposal for glass containers, metal lids, Pur-Pak, and Tetra Pak packaging systems.

Conflict of Interest

The author declares no conflict of interest regarding the publication of this manuscript. Furthermore, the author has fully adhered to ethical norms, including avoiding plagiarism, data falsification, and duplicate publication.

AI Statement

During the preparation of this manuscript, the artificial intelligence tool ChatGPT-5.5 (OpenAI, 2026) was used for structural, linguistic, and stylistic editing of the text in accordance with journal requirements. All factual data, recipe indicators, interpretations, and conclusions were verified by the author. The author bears full responsibility for the content, data, and conclusions of the manuscript.

References

1. FAO, & WHO. (2019). Sustainable healthy diets - Guiding principles. FAO; WHO. Retrieved from https://www.who.int/publications/i/item/9789241516648
2. World Health Organization. (2026). Healthy diet. Retrieved from https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/healthy-diet
3. FAO. (2024). The State of World Fisheries and Aquaculture 2024: Blue Transformation in action. FAO. https://doi.org/10.4060/cd0683en
4. Gavril (Rațu), R. N., Stoica, F., Lipșa, F. D., Constantin, O. E., Stănciuc, N., Aprodu, I., & Râpeanu, G. (2024). Pumpkin and pumpkin by-products: A comprehensive overview of phytochemicals, extraction, health benefits, and food applications. Foods, 13(17), 2694. https://doi.org/10.3390/foods13172694
5. Aziz, A., Noreen, S., Khalid, W., Ejaz, A., Faiz ul Rasool, I., Maham, Munir, A., Javed, M., Ercisli, S., Okcu, Z., Marc, R. A., Nayik, G. A., Ramniwas, S., & Uddin, J. (2023). Pumpkin and pumpkin byproducts: Phytochemical constitutes, food application and health benefits. ACS Omega, 8(26), 23346-23357. https://doi.org/10.1021/acsomega.3c02176
6. Fu, J., Zheng, Y., Gao, Y., & Xu, W. (2022). Dietary fiber intake and gut microbiota in human health. Microorganisms, 10(12), 2507. https://doi.org/10.3390/microorganisms10122507
7. Bacha, A. A., et al. (2024). Role of dietary fiber and lifestyle modification in gut health and sleep quality. Frontiers in Nutrition, 11, 1324793. https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1324793
8. Koyuncu, G. (2025). Sensory analysis methods and quality characteristics of foods. In A. Vilela (Ed.), Sensory analysis in food science: Integration of emo-sensory studies, sensory tests, and artificial intelligence. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.1012198
9. Drake, M. A., Watson, M. E., & Liu, Y. (2023). Sensory analysis and consumer preference: Best practices. Annual Review of Food Science and Technology, 14, 427-448. https://doi.org/10.1146/annurev-food-060721-023619
10. Torrico, D. D., Mehta, A., & Borssato, A. B. (2023). New methods to assess sensory responses: A brief review of innovative techniques in sensory evaluation. Current Opinion in Food Science, 49, 100978. https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100978

11. Socas-Rodríguez, B., Herrera-Herrera, A. V., Gil-Ramírez, A., & Rostagno, M. A. (Eds.). (2024). Sustainable analytical techniques in food science. Elsevier. Retrieved from https://www.sciencedirect.com/book/edited-volume/9780443139598/sustainable-analytical-techniques-in-food-science
12. DSTU 2284:2010. (2010). Live fish. General technical conditions. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy. Retrieved from https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=89335 (in Ukrainian)
13. DSTU 3190-95. (1995). Fresh pumpkins for food use. Technical conditions. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy. Retrieved from https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=83697 (in Ukrainian)
14. DSTU 3583:2015. (2015). Table salt. General technical conditions. Kyiv: SE "UkrNDNC". Retrieved from https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=62230 (in Ukrainian)
15. DSTU ISO 959-1:2008. (2008). Pepper (Piper nigrum L.), whole or ground. Technical conditions. Part 1: Black pepper. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy. Retrieved from https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=84525 (in Ukrainian)
16. DSTU 4399:2005. (2005). Butter. Technical conditions. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy. Retrieved from https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_4399_2005.pdf (in Ukrainian)
17. Hosen, M., Rafii, M. Y., Mazlan, N., Jusoh, M., Oladosu, Y., Chowdhury, M. F. N., & Hossain, M. A. (2021). Pumpkin (Cucurbita spp.): A crop to mitigate food and nutritional challenges. *Horticulturae*, 7(10), 352. https://doi.org/10.3390/horticulturae7100352
18. Zheliezna, V. (2025). Scientific substantiation of the use of dietary fibers in the technology of functional cookies. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 4(6), 47-58. (in Ukrainian)
19. Kovalenko, A. M. (2019). Prospects for the use of pumpkin in the food industry. *Poltava University of Economics and Trade*. Retrieved from https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/dea3858d-6d3c-4b1c-af01-37e114c31ec3/content (in Ukrainian)
20. Davydova, O., & Sysoieva, S. (2025). Gastronomy of the future: Innovation and emotions as keys to competitive advantage. *Global Scientific Trends: Economics and Public Administration*, 2(2), 44-51. Retrieved from https://gst-journal.net.ua/index.php/gst/article/view/47/
21. Davydova, O., Cherevychna, N., Kramarenko, D., Sysoieva, S., & Nechepurenko, K. (2023). Formation of quality indicators of products based on fruits and berries. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(126), 73-82. Retrieved from https://journals.uran.ua/eejet/issue/view/17459
22. U-Report Ukraine. (2024). Healthy eating survey. Retrieved from https://ukraine.ureport.in/opinion/3240/
23. Davydova, O. Yu., & Cherevychna, N. I. (2026). Analyzing the innovation activities of restaurant enterprises and directions for their development. *Business Inform*, 1, 135-143. https://doi.org/10.32983/2222-4459-2026-1-135-143
24. Davydova, O. Yu., & Balatska, N. Yu. (2026). Scientific and methodological approach to evaluating the effectiveness of managing value-creation business processes in restaurant enterprises. *Economic Paradigm*, *3*(107), 103-115. https://doi.org/10.25313/economics-2026-3-107-25

The article was received by the editors 14.04.2026 The article was revised 16.05.2026
The article is recommended for printing 20.05.2026 This article published 30.05.2026

О. Ю. ДАВИДОВА, д-р екон. наук, проф.,
завідувач кафедри готельного, ресторанного бізнесу і крафтових технологій
e-mail: davydova_oks@ukr.net ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-3045-9464

Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця,
пр. Науки, 9а, м. Харків, 61165

ЕКОЛОГО-НУТРИЦІЙНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РЕЦЕПТУРНИХ КОМПОНЕНТІВ НОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ СІЧЕНИХ ВИРОБІВ З РИБИ

Мета. Обґрунтувати доцільність використання гарбузового пюре як локальної рослинної сировини у технології січених виробів з риби з позицій екології людини, сталого харчування, харчової безпечності та ресурсно-орієнтованого виробництва продукції ресторанного господарства.

Методи. Застосовано аналітичне узагальнення сучасних наукових джерел щодо сталих здорових раціонів, харчових волокон, біоактивних компонентів гарбуза та якості рибної продукції; нормативний аналіз вимог до сировини; технологічне моделювання рецептури; розрахункову оцінку харчової та енергетичної цінності; дескриптивну органолептичну оцінку дослідного зразка; інтерпретацію

мікробіологічних показників готової страви. Контрольним рецептурним прототипом розглянуто традиційні рибні котлети без гарбузового пюре.

Результати. Доведено, що додавання гарбузового пюре до рецептури рибних січених виробів забезпечує технологічне, нутриційне й попередньо екологічне значення: підвищує частку рослинного компонента місцевого походження, формує природне забарвлення, сприяє соковитості та м'якій консистенції виробу, а також доповнює рибну білкову основу харчовими волокнами, пектиновими речовинами, вітамінами та каротиноїдами. За розрахунковими даними для рибних котлет з гарбузом на 100 г продукту вміст білків становить 4,06 г, жирів – 9,80 г, вуглеводів – 0,98 г, енергетична цінність – 105,73 ккал. Дослідний зразок має рівну поверхню, помаранчевий відтінок, однорідну ніжну консистенцію, характерний рибний смак із помірним солодкуватим післясмаком гарбуза. Мікробіологічні показники не перевищують встановлених обмежень: патогенні мікроорганізми, зокрема Salmonella spp., не виявлені у 25 г продукту.

Висновки. Розроблена рецептурно-технологічна модель може розглядатися як попередньо обґрунтований напрям еколого-нутриційного удосконалення рибних січених виробів. Її екологічна інтерпретація ґрунтується на локальності рослинної сировини, поєднанні сировини тваринного та рослинного походження та використанні щадних режимів теплової обробки, що дозволяє отримати новий продукт підвищеної біологічної активності із високими органолептичними показниками. Для підтвердження заявлених переваг плануються подальші контрольні експерименти, статистично підтверджена сенсорна оцінка, інструментальне визначення якості та кількісне оцінювання екологічного сліду за методологією життєвого циклу.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *екологія людини, стале харчування, січені вироби з риби, гарбуз, біологічна цінність, безпечність*

Конфлікт інтересів

Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису. Крім того, автор повністю дотримувався етичних норм, включаючи уникнення плагіату, фальсифікації даних та дублювання публікацій.

Декларація про використання ШІ

Під час підготовки цього рукопису для структурного, лінгвістичного та стилістичного редагування тексту відповідно до вимог журналу використано інструмент штучного інтелекту ChatGPT-5.5 (OpenAI, 2026). Усі фактичні дані, рецептурні показники, інтерпретації та висновки були перевірені автором. Автор несе повну відповідальність за зміст, дані та висновки рукопису.

Список використаної літератури

1. FAO, WHO. Sustainable healthy diets – Guiding principles. Rome: FAO; WHO, 2019. 44 p. URL: https://www.who.int/publications/i/item/9789241516648
2. World Health Organization. Healthy diet. Geneva: WHO, 2026. URL: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/healthy-diet
3. FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2024: Blue Transformation in action. Rome : FAO, 2024. URL: https://doi.org/10.4060/cd0683en
4. Gavril (Rațu) R. N., Stoica F., Lipșa F. D., Constantin O. E., Stănciuc N., Aprodu I., Râpeanu G. Pumpkin and Pumpkin By-Products: A Comprehensive Overview of Phytochemicals, Extraction, Health Benefits, and Food Applications. *Foods*. 2024. Vol. 13, № 17. Article 2694. URL: https://doi.org/10.3390/foods13172694
5. Aziz A., Noreen S., Khalid W., Ejaz A., Faiz ul Rasool I., Maham, Munir A., Javed M., Ercisli S., Okcu Z., Marc R. A., Nayik G. A., Ramniwas S., Uddin J. Pumpkin and Pumpkin Byproducts: Phytochemical Constitutes, Food Application and Health Benefits. *ACS Omega*. 2023. Vol. 8, № 26. P. 23346–23357. URL: https://doi.org/10.1021/acsomega.3c02176
6. Fu J., Zheng Y., Gao Y., Xu W. Dietary Fiber Intake and Gut Microbiota in Human Health. *Microorganisms.* 2022. Vol. 10, № 12. Article 2507. URL: https://doi.org/10.3390/microorganisms10122507
7. Bacha A. A. et al. Role of dietary fiber and lifestyle modification in gut health and sleep quality. *Frontiers in Nutrition*. 2024. Vol. 11. Article 1324793. URL: https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1324793
8. Koyuncu G. Sensory Analysis Methods and Quality Characteristics of Foods. In: Vilela A. (ed.). Sensory Analysis in Food Science: Integration of Emo-Sensory Studies, Sensory Tests, and Artificial Intelligence. London : IntechOpen, 2025. URL: https://doi.org/10.5772/intechopen.1012198
9. Drake M. A., Watson M. E., Liu Y. Sensory analysis and consumer preference: best practices. *Annual Review of Food Science and Technology*. 2023. Vol. 14. P. 427–448. URL: https://doi.org/10.1146/annurev-food-060721-023619
10. Torrico D. D., Mehta A., Borssato A. B. New methods to assess sensory responses: a brief review of innovative techniques in sensory evaluation. *Current Opinion in Food Science*. 2023. Vol. 49. Article 100978. URL: https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100978

11. Socas-Rodríguez B., Herrera-Herrera A. V., Gil-Ramírez A., Rostagno M. A. (eds.). Sustainable Analytical Techniques in Food Science. Amsterdam: Elsevier, 2024. URL: https://www.sciencedirect.com/book/edited-volume/9780443139598/sustainable-analytical-techniques-in-food-science
12. ДСТУ 2284:2010. Риба жива. Загальні технічні умови. Київ : Держспоживстандарт України, 2010. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=89335 (дата звернення 10.04.2026)
13. ДСТУ 3190-95. Гарбузи продовольчі свіжі. Технічні умови. Київ : Держстандарт України, 1995. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=83697 (дата звернення 10.04.2026)
14. ДСТУ 3583:2015. Сіль кухонна. Загальні технічні умови. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=62230 (дата звернення 10.04.2026)
15. ДСТУ ISO 959-1:2008. Перець (Piper nigrum L.) горошком або мелений. Технічні умови. Частина 1. Чорний перець. Київ : Держспоживстандарт України, 2008. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=84525 (дата звернення 10.04.2026)
16. ДСТУ 4399:2005. Масло вершкове. Технічні умови. Київ : Держспоживстандарт України, 2005. URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_4399_2005.pdf (дата звернення 10.04.2026)
17. Hosen M., Rafii M. Y., Mazlan N., Jusoh M., Oladosu Y., Chowdhury M. F. N., Hossain M. A. Pumpkin (Cucurbita spp.): A crop to mitigate food and nutritional challenges. *Horticulturae.* 2021. Vol. 7, № 10. Article 352. URL: https://doi.org/10.3390/horticulturae7100352
18. Желєзна В. Наукове обґрунтування використання харчових волокон у технології печива функціонального призначення. *International Science Journal of Engineering & Agriculture.* 2025. № 4(6). С. 47–58.
19. Коваленко А. М. Перспективи використання гарбуза в харчовій промисловості. Полтава: Полтавський університет економіки і торгівлі, 2019. URL: https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/dea3858d-6d3c-4b1c-af01-37e114c31ec3/content
20. Davydova O., Sysoieva S. Gastronomy of the future: innovation and emotions as keys to competitive advantage. *Global Scientific Trends: Economics and Public Administration.* 2025. Vol. 2, № 2. P. 44–51. URL: https://gst-journal.net.ua/index.php/gst/article/view/47/
21. Davydova O., Cherevychna N., Kramarenko D., Sysoieva S., Nechepurenko K. Formation of quality indicators of products based on fruits and berries. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. № 6(126). P. 73–82. URL: https://journals.uran.ua/eejet/issue/view/17459
22. U-Report Ukraine. Опитування «Здорове харчування». 2024. URL: https://ukraine.ureport.in/opinion/3240/
23. Давидова О.Ю., Черевична Н.І. Аналіз інноваційної діяльності підприємств ресторанного господарства та напрями її розвитку. *Бізнес Інформ*. 2026. №1. С. 135–143. https://doi.org/10.32983/2222-4459-2026-1-135-143
24. Давидова О. Ю., Балацька Н. Ю. Науково-методичний підхід до оцінки ефективності управління бізнес-процесами створення цінності підприємств ресторанного господарства. *Економічна парадигма. Серія: Економічні науки*. 2026. № 3 (107). https://doi.org/10.25313/economics-2026-3-107-25

Стаття надійшла до редакції 14.04.2026 Переглянуто 16.05.2026
Стаття рекомендована до друку 20.05.2026 Опубліковано 30.05.2026

https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-15
УДК 664.661

К. Б. НЕЧЕПУРЕНКО, канд. техн. наук.
доцент кафедри готельного, ресторанного бізнесу і крафтових технологій
e-mail: krystyna.nechepurenko@hneu.net ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-1815-2542
Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця,
пр. Науки, 9а, м. Харків, 61165, Україна

ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ХЛІБОПЕКАРСЬКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ ХАРКІВЩИНИ В УМОВАХ СУЧАСНИХ ВИКЛИКІВ

Мета. Визначення еколого-економічних особливостей функціонування хлібопекарської промисловості Харківської області на основі аналізу виробничої динаміки, структури каналів збуту, логістики, умов зберігання, пакування та показників безпечності хлібобулочних виробів, а також окреслення практичних напрямів підвищення ресурсоефективності та екологічної безпеки галузі.

Методи. Методологічну основу роботи становлять системний, порівняльний, статистико-аналітичний і структурно-логічний підходи.

Результати. . Статистичні дані щодо виробництва та реалізації використано для виявлення еколого-економічних тенденцій, а виробничо-збутовий ланцюг розглянуто в послідовності «виробництво - зберігання - пакування - транспортування - реалізація». Це дало змогу виокремити ресурсні, логістичні, санітарно-гігієнічні та відходо-утворювальні чинники. Показано, що екологічна складова хлібопекарської промисловості формується на всіх етапах руху продукції: від використання сировини, енергії та води до пакування, доставки, зберігання й реалізації. Найбільш значущими чинниками є енерго- та водоспоживання, санітарна обробка обладнання і транспорту, короткі строки придатності, утворення органічних і пакувальних відходів, а також потреба у щоденному автомобільному постачанні. Визначено, що скорочення спеціалізованої торговельної мережі впливає на доступність продукції, ускладнює просторову організацію збуту та може підвищувати ризики втрат готових виробів; фактичний вплив на транспортне навантаження потребує окремої оцінки за показниками вантажообігу, кількості рейсів і довжини маршрутів.

Висновки. Екологізація хлібопекарської промисловості Харківщини має спиратися на поєднання технологічних, логістичних і торговельних рішень. Пріоритетними є модернізація енергоємного обладнання, ощадне використання води, оптимізація маршрутів доставки, зменшення втрат нереалізованої продукції, застосування безпечних і придатних до перероблення пакувальних матеріалів, посилення контролю безпечності сировини та готових виробів, а також впровадження елементів екологічного менеджменту.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *екологічна безпека, хлібопекарська промисловість, ресурсоефективність, харчові відходи, пакувальний матеріал*

Як цитувати: Нечепуренко К. Б. Еколого-економічні аспекти функціонування хлібопекарської промисловості Харківщини в умовах сучасних викликів. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2026. Вип. 34. С. 190-206. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-15

In cites: Nechepurenko, K. B. (2026). Ecological and economic aspects of the functioning of the bakery industry in Kharkiv region under current challenges. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology,* (34), 190-206. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-15 (in Ukrainian)

Вступ

Хліб є продуктом повсякденного споживання, що посідає особливе місце у продовольчому забезпеченні населення. Його регулярна присутність у раціоні зумовлює необхідність оцінювати хлібобулочні вироби не лише як соціально значущий товар, а й як елемент харчового ланцюга, для якого важливими є безпечність, стабільність якості та еко-

© Нечепуренко К. Б., 2026

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0

логічна відповідальність виробництва [1]. Сучасні хлібопекарські підприємства мають доступ до різних видів сировини, допоміжних матеріалів, харчових добавок і технологічних поліпшувачів, а також можуть модернізувати обладнання за наявності інвестицій. Водночас така модернізація повинна оцінюватися не лише з позицій продуктивності, а й за критеріями енергоощадності, раціонального водокористування, зменшення втрат сировини та безпечності готової продукції.

Екологічні аспекти хлібопекарської промисловості доцільно розглядати в межах повного виробничо-збутового циклу. Він охоплює закупівлю та підготовку сировини, технологічну переробку, використання енергетичних і водних ресурсів, санітарну обробку обладнання, пакування, транспортування, зберігання і реалізацію виробів. Такий підхід поєднує технологічну, економічну, санітарно-гігієнічну та природоохоронну складові діяльності підприємств.

Для Харківської області ця проблематика має особливу вагу, оскільки хлібопекарська промисловість забезпечує населення продукцією щоденної необхідності. Короткий строк придатності хліба, потреба в регулярних доставках, використання пакування та можливе утворення нереалізованої продукції створюють додаткове ресурсне і відходоутворювальне навантаження. Саме тому оцінювання галузі в еколого-економічному вимірі є важливим для формування більш стійкої моделі її розвитку.

Ринок хлібобулочних виробів є важливою частиною продовольчого ринку України, а його стан впливає на доступність базових продуктів харчування для різних соціальних груп населення [2].

Аналіз цього ринку необхідний для того, щоб підприємства могли коригувати асортимент, обсяги виробництва, канали збуту та логістичні рішення відповідно до попиту. У межах екологічно орієнтованого підходу таке планування також сприяє зменшенню надлишкового виробництва, втрат готової продукції та нераціонального використання ресурсів [3].

Мета роботи полягає у визначенні еколого-економічних аспектів функціонування хлібопекарської промисловості Харківщини шляхом аналізу виробництва, реалізації, логістики, умов зберігання, пакування та показників безпечності хлібобулочних виробів, а також у формуванні рекомендацій щодо підвищення ресурсоефективності й екологічної безпеки галузі.

Для реалізації поставленої мети передбачено виконання таких завдань:

- проаналізувати динаміку виробництва та реалізації хлібобулочних виробів в Україні та Харківській області;
- визначити етапи виробничо-збутового ланцюга, на яких формується екологічне навантаження;
- охарактеризувати ресурсні, логістичні, санітарно-гігієнічні та відходоутворювальні чинники функціонування галузі;
- узагальнити напрями підвищення екологічної безпеки та ресурсоефективності хлібопекарських підприємств.

Об’єкти та методи дослідження

Об’єктом дослідження є хлібопекарська промисловість Харківської області як складова регіональної продовольчої системи. Предметом дослідження виступають еколого-економічні параметри її функціонування, зокрема виробництво, зберігання, пакування, транспортування, реалізація та показники безпечності хлібобулочних виробів.

У роботі застосовано системний, порівняльний, статистико-аналітичний і структурно-логічний методи.

Системний підхід дав змогу розглядати галузь як взаємопов’язаний ланцюг від сировинного забезпечення до реалізації продукції. Порівняльний метод використано для зіставлення виробничої динаміки в часовому та територіальному аспектах.

Статистико-аналітичний метод забезпечив узагальнення кількісних показників, а структурно-логічний - виділення екологічно значущих чинників на окремих етапах руху продукції.

Результати дослідження

Інформаційною основою дослідження є статистичні матеріали Державної служби статистики України [2], дані органів статистики Харківської області та відомості щодо діяльності підприємств хлібопекарської промисловості м. Харкова.

На першому етапі проаналізовано динаміку кількості об'єктів роздрібної торгівлі хлібом і хлібобулочними виробами у Харківській області. Оскільки хліб може реалізовуватися як безпосередньо виробником, так і через посередницькі та роздрібні канали, структура збуту має істотне значення для економічної доступності продукції, логістичного навантаження і втрат у торговельній мережі [2, 4].

Для узагальнення змін у мережі спеціалізованої роздрібної торгівлі хлібом і хлібобулочними виробами в Харківській області використано дані, наведені в табл. 1.

Упродовж досліджуваного періоду загальна кількість підприємств роздрібної торгівлі та ресторанного господарства зменшилася на 2128 одиниць. Така динаміка відображає вплив кризових явищ, трансформацію форм власності, посилення конкуренції та

Таблиця 1

Динаміка кількості підприємств торгівлі та ресторанного господарства, які здійснювали роздрібну торгівлю хлібом та хлібобулочними виробами в Харківській області

Table 1

Dynamics of the number of trade and restaurant enterprises that carried out retail trade in bread And bakery products in the Kharkiv region

Показник	Роки					Абсолютне відхилення, ± (ланцюгове)				Темп змінення, % (ланцюговий)			
	2022	2023	2024	2025	2026	23/22	24/23	25/24	26/25	23/22	24/23	25/24	26/25
П-ва роздр. торгівлі та рестор. господарства, усього, од.	7579	6730	6310	6069	5451	-849	-420	-241	-618	88,8	93,76	96,18	89,82
П-ва роздр. торгівлі та рестор. господарства, що торгували хлібом та хлібобул. виробами, од.	172	96	46	38	24	-76	-50	-8	-14	55,81	47,92	82,61	63,16
Питома вага спеціал.п-в торгівлі хлібом та хлібобул. виробами в заг. кількості, %	2,27	1,43	0,73	0,63	0,44	-0,84	-0,7	-0,1	-0,19	-	-	-	-

переспеціалізацію частини суб'єктів господарювання. Одночасно зростає значення малих і крафтових виробництв, а також власних збутових мереж, що дозволяє виробникам швидше реагувати на попит і частково контролювати втрати продукції [5].

Кількість підприємств роздрібної торгівлі, які реалізували хліб і хлібобулочні вироби, скорочувалася швидше, ніж загальна чисельність торговельних об'єктів. У 2022 р. таких підприємств було 172, у 2023 р. – 96, тобто 55,81% від рівня попереднього року. Надалі тенденція до зменшення зберігалася, і за весь період кількість спеціалізованих об'єктів скоротилася на 148 одиниць. В еколого-логістичному вимірі така концентрація каналів збуту може впливати на просторову організацію постачання: потребувати перебудови маршрутів доставки, змінювати питомі транспортні витрати на одиницю реалізованої продукції та підвищувати ризик утворення нереалізованих залишків у разі менш гнучкого розподілу продукції між торговельними точками. Це, своєю чергою, потенційно пов'язане зі збільшенням паливно-енергетичних витрат у логістиці та обсягів органічних харчових відходів [6].

Наступним етапом є оцінювання динаміки виробництва хлібопекарської продукції у натуральному виразі на рівні України, Харківської області та м. Харкова. Хлібопекарські підприємства відіграють стратегічну роль у продовольчій безпеці, тому зміни обсягів виробництва мають як соціально-економічний, так і екологічний вимір. Від них залежать потреби в сировині, енергії, воді, транспорті та пакувальних матеріалах. Результати наведено в табл. 2.

В Україні виробництво хліба та хлібобулочних виробів змінювалося нерівномірно. У 2023 р. обсяг знизився до 2356 тис. т, або до 96,16% від рівня 2022 р.; у 2024 р. зафіксовано приріст на 3,01%; у 2025 р. показник знову зменшився до 96,0% від рівня 2024 р.; у 2026 р. очікується незначне зростання до 2350 тис. т. Загалом прогнозний рівень 2026 р. залишається нижчим за рівень 2022 р. на 4,08% [7].

У Харківській області виробництво хліба та хлібопродуктів знижувалося до 2025 р.; найбільш відчутне скорочення зафіксовано у 2024 р. порівняно з 2023 р. - на 19,4 тис. т, або 26,9%. У 2026 р. прогнозується відновлення виробництва до 134,4 тис. т.

Для м. Харкова характерна подібна траєкторія: у 2022-2025 рр. виробництво зменшувалося, а у 2026 р. очікується помірне зростання на 1,92% порівняно з 2025 р. [8].

Таблиця 2

Аналіз виробництва хлібу та хлібобулочних виробів підприємствами хлібопекарської промисловості України, Харківської області та міста Харкова (тис.т.)

Table 2

Analysis of the production of bread and bakery products by enterprises of the baking industry of Ukraine, Kharkiv region and the city of Kharkiv (thousand tons)

Виробництво	2022	2023	2024	2025	2026
В Україні	2450	2356	2427	2330	2350
Темпи росту в % до попереднього	-	96,16	103,01	96,0	100,86
Темпи росту в % до 2002 року	-	96,16	99,06	95,1	95,92
В Харківській області	140,4	136,0	126,6	124,2	134,4
Темпи росту в % до попереднього	-	96,87	93,1	98,1	108,21
Темпи росту в % до 2002 року	-	96,87	90,18	88,46	95,73
В Харкові	79,2	79,5	76,0	67,6	68,9
Темпи росту в % до попереднього	-	100,38	95,6	88,95	101,92
Темпи росту в % до 2002 року	-	100,38	95,96	85,35	86,99

Дані за 2026 рік наведено як прогнозні показники Інституту досліджень аграрної політики України.

Динаміка виробництва хліба має безпосереднє екологічне значення, оскільки визначає потреби у паливно-енергетичних ресурсах, воді, пакувальних матеріалах, транспортних операціях та обсягах потенційних органічних відходів. Тому стабілізація або нарощування виробництва повинні супроводжуватися впровадженням енергоефективних технологій, контролем виробничих втрат і розвитком систем екологічного менеджменту.

Подальший аналіз зосереджено на тих характеристиках хлібопекарського сектору, які мають значення для безпечності харчових продуктів: класифікації виробів, строках і умовах зберігання, процесах старіння, мікробіологічних ризиках та поводженні з продукцією під час реалізації.

В умовах конкуренції та зростання уваги споживачів до натуральності, якості й безпечності продуктів ключовими чинниками попиту залишаються асортимент і стабільність споживчих властивостей. Для екологічно орієнтованого виробництва ці чинники необхідно поєднувати з ресурсною ощадністю та мінімізацією відходів.

Для систематизації послідовності дослідження та оцінювання екологічної складової виробництва використано принципову схему проведення дослідів (рис. 1).

Екологічну складову оцінено за групами чинників: споживання енергії та води, енергоємність технологічних операцій, санітарна обробка виробничого обладнання і транспорту, утворення органічних та пакувальних відходів, строки придатності, транспортне навантаження, а також показники безпечності хліба і хлібобулочних виробів.

Контроль якості та безпечності готових виробів розглянуто за органолептичними, фізико-хімічними і мікробіологічними показниками. Відбір проб здійснювали згідно з ГОСТ 9402-82 та ГОСТ 5665-65, що дозволяє забезпечити порівнюваність лабораторних результатів і репрезентативність оцінювання партій продукції.

До базових органолептичних ознак належать стан поверхні, колір і структура м'якушки, смак, запах та загальна свіжість виробу. Серед фізико-хімічних показників для виробів із дріжджового тіста важливим є питомий об'єм, який залежить від газоутримувальної здатності тіста, стійкості збитої маси та режимів технологічної обробки [16].

Питомий об'єм батонів визначали як величину, обернену до щільності; щільність, у свою чергу, обчислювали як співвідношення маси виробу до його об'єму.

Для контролю якості хліба і хлібобулочних виробів відбір зразків за органолептичними та фізико-хімічними показниками проводять із представницької вибірки відповідно до ГОСТ 5667-65.

Під час органолептичного контролю, крім форми, поверхні та кольору, оцінюють наявність сторонніх включень, хруст від мінеральних домішок, ознаки хвороб і плісняви; для цього від представницької партії відбирають п'ять одиниць продукції [9].

У разі перевірки якості контролюючими організаціями зазвичай формують три лабораторні зразки. На хлібопекарському підприємстві два з них упаковують, пломбують або опечатують і передають до лабораторії контролюючої організації, а третій досліджують у лабораторії виробника.

Під час відбору зразків у торговельній мережі всі три лабораторні зразки пакують аналогічно: два спрямовують до лабораторії контролюючої організації, один - до лабораторії підприємства-виробника.

У лабораторії контролюючої організації аналізують один із зразків, а другий зберігають у запакованому вигляді для можливого повторного дослідження у разі розбіжностей в оцінці якості [16].

Кожен лабораторний зразок має супроводжуватися актом відбору, де зазначають найменування виробу і підприємства-виробника, дату та місце відбору, обсяг і номер партії, час виходу виробів із печі або часові межі випікання партії, перелік показників для аналізу, а також прізвища і посади осіб, які здійснили відбір.

Оцінювання якості хліба здійснюють за органолептичними ознаками (зовнішній вигляд, стан м'якушки, смак і запах) та фізико-хімічними параметрами (вологість, кислотність, вміст цукру, жиру, пористість), що узагальнено в табл. 3 і табл. 4.

М'якушка пшеничного хліба зазвичай світліша і більш пориста, а смак менш кислий порівняно з житнім хлібом із обойного борошна.

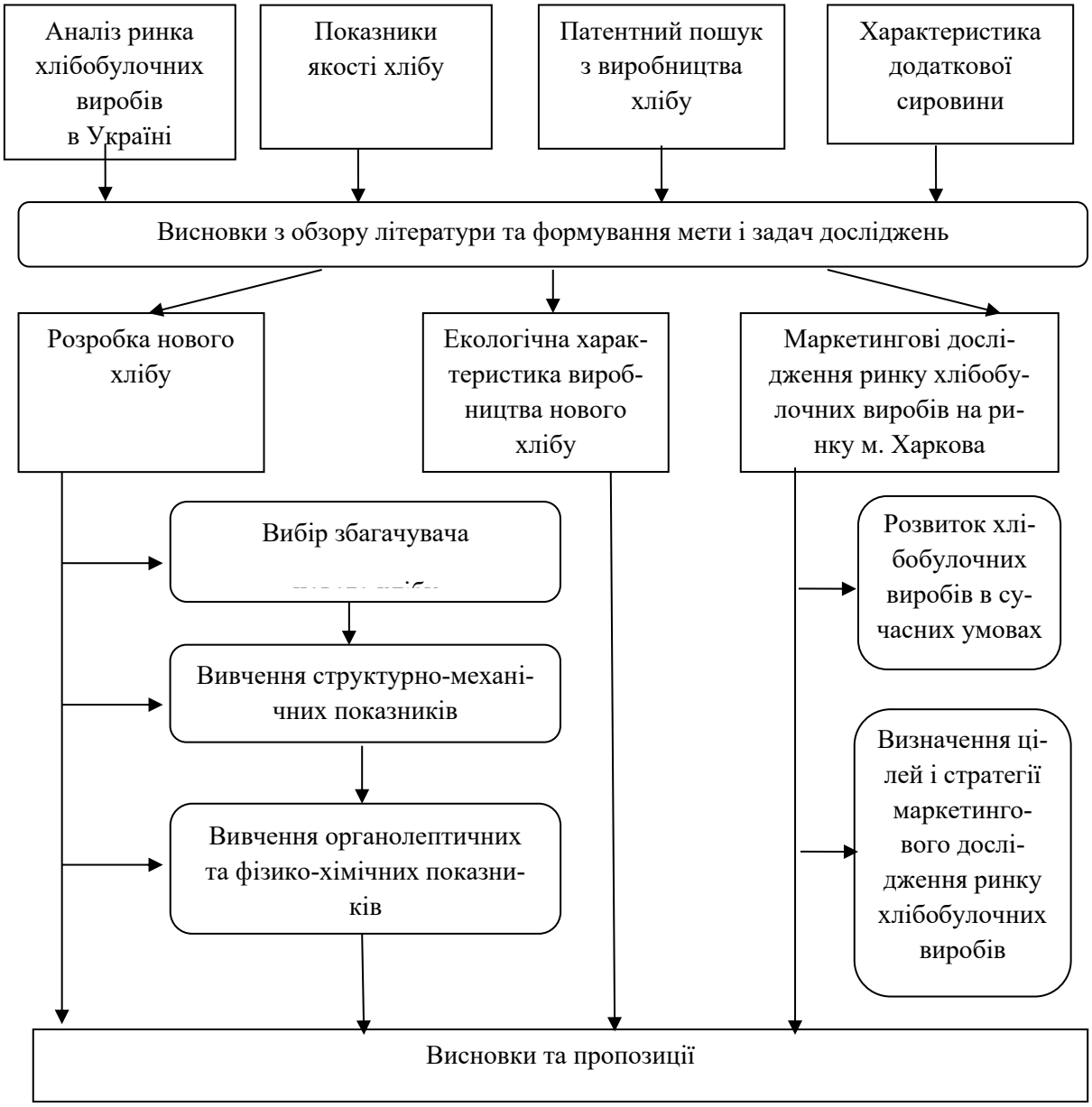


Рис. 1 – Принципова схема проведення досліджень
Fig. 1 - Schematic diagram of research

Форма житнього хліба має бути правильною, без деформацій, притисків і надмірного розпливання. Для формових виробів вона повинна відповідати хлібній формі з помірно випуклою верхньою кіркою, для подових - бути круглою, овальною або довгасто-овальною. Поверхня має бути без значних тріщин і підривів; для окремих виробів допускаються надрізи або наколи [10].

Колір кірки повинен відповідати виду і сорту виробу та перебувати в діапазоні від світло-жовтого до темно-коричневого без ознак підгоряння або надмірної блідості.

Товщина кірки хліба не повинна перевищувати 4 мм; для батонів і дрібноштучних виробів цей показник стандартом не нормується.

Стан м'якушки характеризують за пропеченістю, відсутністю липкості, грудочок, пустот і слідів непромісу, рівномірністю пористості та еластичністю.

Після легкого натискання м'якушка має відновлювати форму; смак і запах повинні відповідати конкретному виду хліба без сторонніх відтінків.

Фізико-хімічна оцінка передбачає визначення вологості м'якушки, кислотності та пористості.

Нормативи вологості залежать від виду виробу, рецептури та способу випікання: для

Таблиця 3

Органолептичні показники хліба пшеничного

Table 3

Organoleptic characteristics of wheat bread

Показник	Характеристика
Зовнішній вигляд	**Форма формового хліба:** відповідає хлібній формі, у якій проводилось випікання; верхня скоринка дещо випукла, без бокових випливів. **Форма подового хліба:** округла, овальна або видовжено-овальна, не розпливчаста, без притисків. Допускаються 1-2 невеликі злипи за умови вироблення на тунельних печах із механізованим пересаджуванням. **Поверхня:** без великих тріщин і підривів; з наколами або надрізами чи без них відповідно до технічного опису. Допускається наявність шва від дільника.
Колір	Від світло-жовтого до темно-коричневого (на верхній скоринці).
Стан м'якушки	**Пропеченість:** м'якушка пропечена, не волога на дотик. **Еластичність:** після легкого натискання пальцями м'якушка відновлює початкову форму. **Проміс:** без грудочок і слідів непромісу. **Пористість:** розвинена, без пустот і ущільнень.
Смак	Властивий даному виду виробу, без стороннього присмаку.
Запах	Властивий даному виду виробу, без стороннього запаху.

Таблиця 4

Фізико-хімічні показники хліба пшеничного

Table 4

Physico-chemical indicators of wheat bread

Найменування показників	Хліб пшеничний з борошна вищого гатунку подовий	Хліб пшеничний з борошна вищого гатунку формовий
Вологість м'якушки,%, не більше	43,0	44,0
Кислотність м'якушки, град, не більше	3,0	3,0
Пористість м'якушки,%, не менше	70,0	72,0

житнього простого і заварного хліба встановлюється рівень не більше 51%, для пшеничного хліба з обойного борошна - не більше 48%; подові вироби, як правило, мають нижчу вологість, ніж формові. Надмірна вологість погіршує смак, знижує поживну цінність і скорочує строк зберігання [11].

Кислотність формується під впливом сорту борошна та способу приготування тіста. Вона визначає смакові властивості виробу і може бути індикатором правильності ведення технологічного процесу.

Житні вироби, виготовлені на заквасці, характеризуються вищою кислотністю (до 12 град.), тоді як для пшеничних виробів на дріжджах цей показник зазвичай не перевищує 4 град.

Стан м'якушки оцінюють за сукупністю ознак: пропеченістю, якістю промісу, пористістю, еластичністю та свіжістю. У якісного виробу м'якушка суха на дотик, нелипка, без грудочок і непромішаних ділянок, а пористість визначають як частку об'єму пор у загальному об'ємі м'якушки, виражену у відсотках.

Вища та рівномірніша пористість сприяє кращому збереженню свіжості та повнішому засвоєнню хліба. Еластична м'якушка після стискання швидко повертається до початкової форми.

Свіжі вироби мають рівну суху кірку, однорідну еластичну м'якушку, м'яку консистенцію, характерні для цього виду смак і запах без гіркоти, сторонніх присмаків або запахів [12].

Показники безпечності хліба і хлібобулочних виробів повинні відповідати встановленим допустимим рівням вмісту токсичних елементів, мікотоксинів, пестицидів і радіонуклідів (табл. 5).

Таблиця 5

Показники безпечності хліба і хлібобулочних виробів

Table 5

Safety indicators of bread and bakery products

Група показників	Найменування показника	Допустимий рівень, не більше
Токсичні елементи	Свинець	0,35 мг/кг
	Миш'як	0,15 мг/кг
	Кадмій	0,07 мг/кг
	Ртуть	0,015 мг/кг
Мікотоксини	Афлатоксин В1	0,005 мг/кг
	Дезоксиніваленол	0,7 мг/кг
	Т-2 токсин	0,1 мг/кг
	Зеараленон	0,2 мг/кг
Пестициди	Гексахлорциклогексан (α-, β-, γ-ізомери)	0,5 мг/кг
	Ртутьорганічні пестициди	0,01 мг/кг
	2,4-Д кислота, її солі, ефіри	Не допускається
Радіонукліди	Цезій-137	40 Бк/кг
	Стронцій-90	20 Бк/кг
Санітарний стан	Забрудненість, зараженість шкідниками хлібних запасів: комахи, кліщі	Не допускається

Нормативною основою для оцінювання перелічених груп показників є чинні санітарні та гігієнічні нормативи щодо забруднювачів харчових продуктів, залишків пестицидів і вмісту радіонуклідів, а також профільні національні стандарти на хліб із пшеничного та житнього борошна [24-28].

Дефекти хліба можуть бути зумовлені якістю основної та допоміжної сировини, помилками дозування, порушеннями технологічного режиму або неналежним поводженням із виробами після випікання.

За характером прояву дефекти поділяють на дефекти зовнішнього вигляду, м'якушки, смаку та запаху.

До дефектів зовнішнього вигляду належать неправильна форма, тріщини й надриви на кірці, підгоріла або надто бліда поверхня, а також відсутність характерного глянцю.

Неправильна форма може виникати через недостатню якість клейковини борошна, порушення формування заготовок або відхилення від оптимального режиму вистоювання тіста.

Екологічні аспекти виробничо-збутового ланцюга хлібобулочних виробів. Екологічне навантаження хлібопекарської промисловості формується не лише у печах і тістомісильних відділеннях. Воно розподілене між усіма ланками життєвого циклу продукції: виробництвом, пакуванням, транспортуванням, зберіганням і реалізацією (табл. 6). Для хлібобулочних виробів це особливо істотно через короткий строк придатності, щоденну логістику та підвищені санітарно-гігієнічні вимоги.

На виробничому етапі ключовими чинниками є споживання енергоресурсів під час випікання, використання води для технологічних і санітарних потреб, утворення залишків сировини та бракованої або нереалізованої продукції. Зменшити навантаження можна за рахунок енергоощадних печей, обліку й нормування водоспоживання, оптимізації рецептур і технологічних режимів, а також запобігання виробничим втратам.

Логістична ланка має особливе значення, оскільки свіжа продукція потребує регулярного завезення до торговельних точок. Автомобільний транспорт забезпечує швидкість і гнучкість постачання, але водночас зумовлює витрати пального, викиди та необхідність санітарної обробки кузовів і тари. Тому екологічний ефект можуть дати оптимізація маршрутів, раціональне формування партій і розвиток локальних каналів збуту.

Пакування виконує захисну функцію: зменшує ризик вторинного забруднення, уповільнює втрату свіжості та може скорочувати харчові втрати. Разом із цим полімерна тара збільшує обсяг пакувальних відходів. Отже, екологізація пакування повинна поєднувати вимоги безпечності харчових продуктів, збереження їхньої якості та мінімізацію впливу пакувальних матеріалів на довкілля.

Таблиця 6

Екологічні аспекти виробничо-збутового ланцюга хлібобулочних виробів

Table 6

Environmental aspects of the production and sales chain of bakery products

Етап	Екологічно значущий чинник	Потенційний вплив	Напрям удосконалення
Виробництво	Споживання енергії під час випікання	Зростання енергоємності продукції, непрямі викиди парникових газів	Використання енергоощадного обладнання, оптимізація режимів випікання
Виробництво	Використання води та санітарна обробка обладнання	Збільшення водоспоживання та обсягів стічних вод	Контроль витрат води, раціоналізація санітарних процедур
Зберігання	Короткі строки придатності продукції	Ризик утворення харчових відходів	Прогнозування попиту, оптимізація партій виробництва
Пакування	Використання полімерних матеріалів	Утворення пакувальних відходів	Перехід на придатні до перероблення або екологічно безпечні матеріали
Транспортування	Щоденне автомобільне постачання	Витрати пального, транспортні викиди	Оптимізація маршрутів, локалізація збуту
Реалізація	Недотримання умов зберігання та строків реалізації	Втрати продукції, санітарні ризики	Контроль умов продажу, управління залишками продукції
Безпечність	Наявність токсичних елементів, мікотоксинів, пестицидів, радіонуклідів	Ризики для здоров'я населення та харчової безпеки	Моніторинг сировини й готової продукції

На етапі реалізації основними екологічно значущими умовами є дотримання строків придатності, належний санітарний стан торговельного обладнання, правильне зберігання і запобігання накопиченню простроченої продукції. Нереалізований хліб утворює харчові відходи, тому прогнозування попиту та управління залишками мають одночасно економічне й природоохоронне значення.

Отримані результати підтверджують, що хлібопекарська промисловість Харківщини має чітко виражений еколого-економічний характер. Галузь забезпечує населення соціально важливим продуктом, але для цього постійно використовує сировинні, енергетичні, водні, пакувальні й транспортні ресурси. Тому аналіз виробництва, збуту, логістики та якості продукції доцільно доповнювати оцінкою ресурсного навантаження і ризиків утворення відходів.

Серед найбільш відчутних проблем для хлібопекарських підприємств залишаються високі тарифи на енергоносії, податкове навантаження та недостатній розвиток ринкової інфраструктури, особливо під час забезпечення віддалених населених пунктів. Для таких територій постачання хліба часто є малопривабливим через значні транспортні витрати та обмежену кількість облаштованих місць продажу [13].

Розвиток конкуренції на ринку хліба проявляється у появі нових виробників, розширенні асортименту, поліпшенні доступності продукції протягом дня та збільшенні кількості торговельних точок. Водночас ці позитивні зрушення супроводжуються ризиками: зростанням цін, нерівномірним доступом до якісної продукції та збільшенням логістичних витрат. У природоохоронному вимірі це вимагає узгодження конкуренції з раціональним плануванням виробництва і збуту.

Основними ринками збуту хлібобулочних виробів у м. Харкові є магазини міста, власна торгова мережа підприємств і посередники. Обсяги реалізації за цими каналами подано в табл. 7 [15].

Дані табл. 7 визначають, що найбільша частина хлібобулочних виробів реалізується через магазини міста. Такий канал

Таблиця 7

Ринки збуту хлібобулочних виробів

Table 7

Markets for bakery products

Ринки збуту	Обсяг реалізованої продукції (Хлібобулочні вироби)	Обсяг реалізованої продукції (Хлібобулочні вироби)
	т	%
Магазини міста	261,8	58,3
Власна торгова мережа	97,9	21,8
Посередники	89,6	19,9
Разом	449,3	100

має переваги завдяки ширшому асортименту, можливості надання додаткових послуг, кращій організації торговельних процесів і вищому рівню обслуговування споживачів.

Дрібнороздрібна мережа також залишається важливою для реалізації хлібобулочних виробів. До неї належать павільйони, кіоски, намети, лотки та інші малі торговельні формати. Її перевагою є мобільність і наближеність до споживача, а недоліками - вужчий асортимент, обмежені умови зберігання та складність забезпечення належного санітарного режиму.

Безперебійність постачання хліба значною мірою залежить від організації транспортної роботи. Транспорт з'єднує виробника з торговельною мережею, впливає на швидкість обігу продукції, збереження її споживчих властивостей і доступність для населених пунктів. Водночас саме логістика формує частину енергетичних витрат, викидів і санітарних ризиків у виробничо-збутовому ланцюзі.

Через короткий строк придатності хлібобулочні вироби потребують щоденного або майже щоденного завезення до магазинів і дрібнороздрібної мережі. Автомобільний транспорт забезпечує маневреність, можливість доставки невеликими партіями і регулярність перевезень, але потребує ретельного планування маршрутів, контролю санітарного стану кузовів і раціонального повернення тари.

Під час купівлі хлібобулочних виробів споживачі звертають увагу на зовнішній вигляд торговельного об'єкта та продукції. Негативно впливають на реалізацію наявність виробів із вичерпаним строком придатності, забруднені полиці, дефекти виробів, нестача необхідного інвентарю та порушення умов зберігання. У контексті екологічної безпеки ці чинники також підвищують ризик харчових втрат і санітарного неблагополуччя [18].

Нині спостерігається зниження споживання хлібобулочних виробів.

Скорочення споживання хліба може бути пов'язане з такими чинниками:

- зменшенням сировинного забезпечення хлібопекарської промисловості;
- обмеженням купівельної спроможності населення, коли навіть продукти повсякденного попиту стають менш доступними;
- переходом частини домогосподарств до домашнього випікання хліба;
- зростанням доходів окремих груп населення та переорієнтацією попиту на дорожчі й більш різноманітні харчові продукти [19].

Динаміка споживання хліба традиційно відображає не лише харчові звички, а й соціально-економічний стан населення.

Зменшення споживання може свідчити як про раціоналізацію раціону, так і про зміну структури доступних продуктів, тому цей показник потребує обережної інтерпретації.

За умов зниження доходів попит на хлібобулочні вироби може залишатися відносно стійким або навіть зростати, оскільки хліб належить до базових і порівняно доступних продуктів харчування [18].

Актуальним залишається питання оновлення та гармонізації стандартів на хлібобулочні вироби. За повідомленнями щодо контролю якості, у 2024 р. територіальними органами у сфері захисту прав споживачів було забраковано й знято з реалізації 12% хлібобулочних виробів від загальної кількості перевірених. Середня рентабельність хлібопекарських підприємств у 2024 р. становила 6-7%. Однією з помітних ринкових тенденцій є реструктуризація та концентрація власності, а також вихід із Харківського ринку частини малоперспективних виробників основної групи [10].

Виробники відзначають стабільне зростання випуску продукції дорожчого сегмента, що частково компенсує витрати на вироб-ництво низькорентабельних соціально значущих видів хліба і відповідає попиту на більш різноманітну продукцію.

Помітною тенденцією ринку є збільшення частки упакованої продукції, що пов'язано із запитами споживачів на зручність, гігієнічність та подовження строків зберігання.

Виробництво хліба і хлібобулочних виробів у розрахунку на одну особу становить 300-330 г на добу [20].

За результатами опитування щодо стану торгівлі хлібом і хлібобулочними виробами (рис. 2), 55,0% покупців відзначили поліпшення ситуації, 37,0% не побачили істотних змін, а 8% вказали на певне погіршення.

Укладання хліба і хлібобулочних виробів у лотки має відповідати правилам укладання, зберігання та перевезення, визначеним ГОСТ 8227-56. Дотримання цих вимог важливе не лише для товарного вигляду, а й для запобігання вторинному забрудненню продукції.

Після випікання вироби розміщують у чистих лотках, а продукцію з дефектами вилучають. Можливе використання дерев'яних або полімерних лотків; для великих виробів застосовують лотки з гратчастим дном, а для іншої продукції - конструкції із суцільним дном.

З екологічного погляду важливо забезпечувати багаторазове використання тари, її миття, дезінфекцію та контроль зношування.

Хлібосховища мають бути чистими, сухими і добре вентильованими. У таких приміщеннях не допускається зберігання сторонніх продуктів і матеріалів, а також накопичення бракованих виробів.

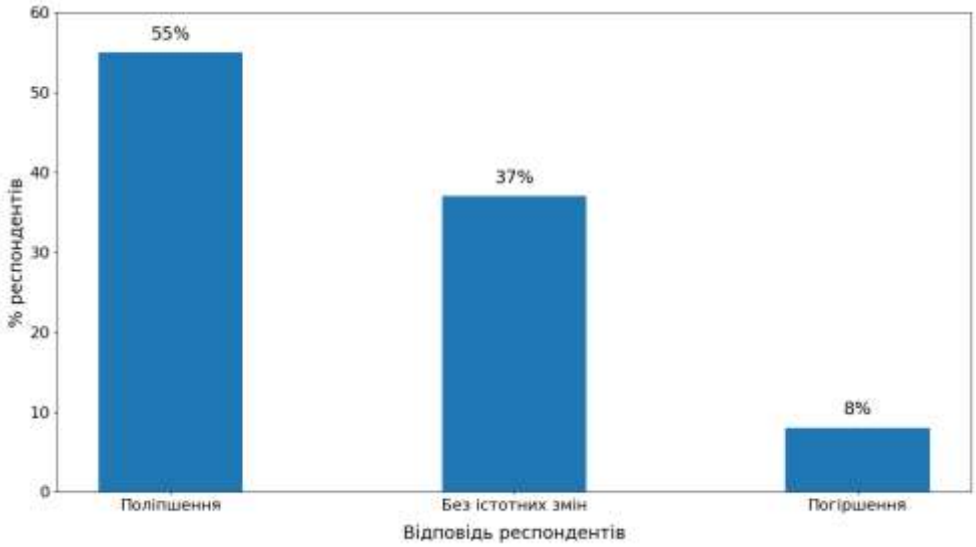


Рис. 2 – Результати опитування респондентів щодо стану торгівлі хлібом і хлібобулочними виробами

Fig. 2 – Survey results on the state of trade in bread and bakery products

Транспортні засоби для перевезення хліба та хлібобулочних виробів повинні відповідати санітарно-гігієнічним вимогам і забезпечувати захист продукції від забруднення під час доставки.

З екологічної позиції транспортне забезпечення є однією з ключових ланок галузі. Короткий строк реалізації потребує частих рейсів, що збільшує витрати пального та викиди. Несвоєчасна доставка або нераціональні маршрути можуть також спричинити втрату свіжості продукції й зростання харчових відходів. Отже, оптимізація логістики одночасно підвищує економічну ефективність і знижує екологічне навантаження.

Для хлібних виробів встановлюють максимальні строки зберігання (табл. 8), які враховують інтенсивність черствіння різних видів продукції. Перевищення цих строків є підставою для бракування виробів як зачерствілих; на підприємстві відлік ведуть від моменту виходу хліба з печі до передачі його споживачу.

Після випікання хліб фактично є мікробіологічно безпечним, однак під час зберігання і транспортування за порушення санітарних правил він може бути повторно забруднений мікроорганізмами.

Для захисту продукції нині застосовують різні види м'якої тари, зокрема целофанову, поліетиленову, поліпропіленову, термоусадочну та інші синтетичні плівки.

Таблиця 8

Терміни зберігання хліба

Table 8

Bread storage life, hours

Вироби	Максимально допустимі строки витримки на підприємстві, год.	Терміни реалізації в торгівлі, год.
Вагові та штучні з ржанойобойной борошна, з житньо-пшеничного, пшеничного обойного і обдирного борошна	14	36
Хлібобулочні з пшеничного сортовий і житнього сортового борошна масою більше	10	24
Дрібноштучні з пшеничного сортового і житнього сіяного борошна, масою і менше	6	16

тами, не взаємодіяти з компонентами хліба та забезпечувати належний бар'єр для вологи і газів. Перед пакуванням вироби охолоджують; у термоусадочну плівку їх можуть пакувати гарячими. Пакування уповільнює черствіння на 4-5 діб і сприяє збереженню санітарного стану під час транспортування [8].

Екологічний ефект пакування є неоднозначним. Воно зменшує ризик забруднення, подовжує реалізаційний період і скорочує харчові втрати, але водночас збільшує кількість пакувальних відходів. Тому для галузі важливо переходити до безпечних, придатних до перероблення або багаторазових пакувальних рішень, не погіршуючи захист продукції.

Окремої уваги потребують ризики фальсифікації хліба і хлібобулочних виробів, оскільки вони стосуються не лише прав споживачів, а й безпечності харчових продуктів та екологічної безпеки виробничо-збутового ланцюга.

Асортиментна фальсифікація може проявлятися у підміні виробів із борошна одного сорту виробами з іншого сорту або у продажу продукції одного виду під виглядом іншої.

Таку підміну іноді можна попередньо запідозрити за кольором, однак достовірний висновок потребує лабораторного аналізу фізико-хімічних показників, зокрема вмісту клітковини, пентозанів, кальцію, фосфору та заліза.

Можлива також реалізація пшенично-житнього хліба під виглядом хліба з борошна першого сорту. Таку підміну виявляють, зокрема, за підвищеною кислотністю виробу, встановленою лабораторними методами.

Якісна фальсифікація може бути пов'язана з підвищеним умістом води, домішуванням інших сортів борошна, використанням харчових добавок і поліпшувачів, заміною дріжджів хімічними розпушувачами, застосуванням барвників, недовкладенням цінних рецептурних компонентів або заміною дорогих інгредієнтів дешевшими, а також із порушенням технологічних параметрів і необґрунтованим застосуванням консервантів.

Надмірне зволоження виробів частіше може спостерігатися в холодний період року, тоді як улітку воно підвищує ризик розвитку картопляної хвороби та пліснявіння.

Під час виробництва хліба з певного сорту борошна можливе додавання 15-25% борошна іншого сорту; без лабораторного контролю така підміна може залишатися малопомітною для споживача.

Поширеним прийомом є використання поліпшувачів борошна. З технологічного погляду вони можуть коригувати властивості сировини низької якості, однак для споживача принципово важливо, щоб склад і призначення таких добавок були відкрито зазначені в документації та маркуванні.

Один із варіантів полягає у вибілюванні борошна через окисно-відновні процеси: борошно нижчого сорту обробляють речовинами, які змінюють його колір, після чого вироби можуть помилково сприйматися як продукція з борошна вищого сорту.

У спеціальній літературі як агенти, що здатні вибілювати борошно або коригувати його технологічні властивості, описують піросульфіт натрію, перекис кальцію, перекис бензоїлу, карбамід, азодикарбонамід, натрієві й калієві солі цистину та цистеїну, бромат калію і бромат кальцію. Водночас правомірність використання будь-якої з таких речовин у

виробництві хліба в Україні визначається не фактом її технологічної ефективності, а наявністю у чинному переліку дозволених харчових добавок і дотриманням установлених умов застосування [29].

Інший підхід передбачає використання комплексоутворювачів та ферментних препаратів для корекції борошна з низькою клейковиною. До таких речовин можуть належати лактати кальцію, амонію і магнію, фосфати кальцію та амонію, стерилтартрат, хлорид амонію, сульфати, оксид кальцію, хлорне залізо, амілази і протеази. Застосування харчових добавок і харчових ензимів допускається лише за умов, установлених відповідними Вимогами МОЗ України, з дотриманням дозволеної категорії продукту, призначення речовини та правил маркування [29, 30].

Третім різновидом є застосування хімічних розпушувачів, які прискорюють виділення вуглекислого газу та можуть змінювати природний перебіг бродіння тіста.

До розпушувачів можуть належати пірофосфати, карбонати натрію й амонію, глюконова кислота та глюконо-дельта-лактон. Використання таких речовин має відповідати Вимогам до харчових добавок, а їх наявність у складі продукту повинна бути відображена в інформації для споживача відповідно до законодавства про маркування харчових продуктів [29, 31].

Скорочення або заміна природного процесу бродіння хімічним розпушуванням може погіршувати смак, аромат і структуру хліба. Така продукція втрачає частину традиційних споживчих властивостей, а її оцінювання потребує поєднання органолептичних і лабораторних методів.

Повна заміна бродіння хімічним розпушуванням може супроводжуватися появою нехарактерного запаху та погіршенням органолептичних властивостей виробу.

Здобні булочні вироби можуть фальсифікуватися через недовкладення цінних компонентів, передбачених рецептурою (олії, яєць, цукру, маку, родзинок, горіхів), або через заміну дорожчих інгредієнтів дешевшими аналогами, наприклад маргарину - рослинною олією чи гідрожиром.

Порушення температурних режимів випікання, особливо для житніх і житньо-пшеничних виробів, може призводити до надходження у продаж непропеченої продукції. Ознакою такого дефекту є те, що м'якушка після натискання не відновлює форму і може прилипати до пальців.

Для подовження строків зберігання до хлібобулочних виробів можуть додаватися консерванти. Таке застосування має бути технологічно обґрунтованим, нормативно дозволеним відповідно до Вимог до харчових добавок і обов'язково відображеним у маркуванні, адже приховування добавок або некоректне зазначення складу є порушенням вимог до інформації про харчовий продукт [29, 31].

Кількісна фальсифікація полягає у недоважі, тобто у відхиленні фактичної маси виробу від установлених параметрів понад допустимі межі.

Історично маса формового пшеничного хліба змінювалася: від 1 кг до 800 г, 750 г, а нині іноді до 700-650 г. Тому під час реалізації виробів, виготовлених за технічними умовами, необхідний чіткий контроль фактичної маси та відповідності маркуванню.

Виявлення недоваги здійснюють шляхом зважування вибірки, наприклад 10 одиниць продукції, на повірених вагах із подальшим визначенням середньої маси одного виробу.

Інформаційна фальсифікація полягає у наданні споживачу неповних, недостовірних або спотворених відомостей про товар.

Вона може проявлятися у неправильному зазначенні найменування виробу, сорту борошна, рецептурного складу, використаних компонентів, а також у неточностях товаросупровідних документів, маркування або рекламних матеріалів.

До інформаційних порушень також належить підміна сертифікатів відповідності та супровідних документів. Отже, запобігання фальсифікації хлібобулочних виробів є складовою екологічної безпеки харчового ланцюга, оскільки забезпечує простежуваність сировини, контроль добавок і захист здоров'я споживачів.

Висновки

Хлібопекарська промисловість Харківщини має важливе соціально-економічне значення і водночас створює низку екологічно значущих впливів. Вони проявляються під час виробництва, зберігання, пакування, транспортування та реалізації хлібобулочних виробів.

Аналіз виробництва і збуту показав, що зміни обсягів хлібобулочної продукції впливають на потреби в енергії, воді,

пакувальних матеріалах, транспортних послугах та на потенційне утворення харчових відходів. Скорочення спеціалізованих торговельних об'єктів може ускладнювати забезпечення населення свіжою продукцією, змінювати просторову організацію збуту та підвищувати ризик втрат у виробничо-збутовому ланцюзі. Водночас фактичний вплив цього процесу на логістичне навантаження потребує окремого оцінювання за показниками вантажообігу, кількості рейсів і середньої довжини маршрутів.

Найбільш вагомими екологічними аспектами галузі є енергоспоживання під час випікання, використання води для технологічних і санітарних потреб, утворення органічних відходів, застосування пакувальних матеріалів, транспортні викиди та контроль безпечності сировини і готової продукції. Особливої уваги потребують короткі строки реалізації, оскільки прострочені або нереалізовані вироби перетворюються на харчові відходи.

Пакування має подвійний ефект: воно підтримує санітарну безпечність і якість продукції, проте може збільшувати обсяг відходів. Перспективним є використання матеріалів, придатних до перероблення, зменшення надлишкового пакування та впровадження рішень, що одночасно зберігають продукт і мінімізують навантаження на довкілля.

Підвищення екологічної безпеки та ресурсоефективності хлібопекарської промисловості Харківщини потребує енергоощадного обладнання, оптимізації технологічних режимів, раціонального водокористування, удосконалення маршрутів доставки, зменшення втрат готової продукції, контролю умов зберігання й реалізації, а також розвитку екологічного менеджменту на підприємствах.

Отже, екологізація хлібопекарської промисловості повинна охоплювати весь виробничо-збутовий ланцюг - від добору сировини та технології випікання до пакування, транспортування, реалізації й поводження з залишками продукції.

Такий підхід узгоджується з принципами збалансованого природокористування та сприяє стійкості продовольчого забезпечення регіону.

Конфлікт інтересів

Авторка повідомляє про відсутність конфлікту інтересів. Крім того, авторка дотримувалась етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Декларація щодо використання штучного інтелекту

Під час підготовки рукопису було використано інструмент штучного інтелекту ChatGPT (OpenAI, 2026) для мовного редагування, структурного впорядкування окремих фрагментів і підвищення відповідності тексту вимогам наукового видання. Наукові положення, фактичні дані, інтерпретації та висновки перевірені авторкою, яка несе повну відповідальність за зміст рукопису.

Список використаної літератури

1. Берендій Ю. Буде свіжим рази довше: що відразу потрібно зробити з хлібом після покупки. 2024.: URL: https://glavred.net/life/budet-svezhim-v-razy-dolshe-chto-srazu-nuzhno-sdelat-s-hlebom-posle-pokupki-10579502.html (дата звернення: 26.03.2026).
2. Офіційний сайт Державної служби статистики України. URL: http://www.ukrstat.gov.ua/ (дата звернення: 18.03.2026).
3. В Україні зростає ціна на хліб: із чим це пов'язано. URL: https://thepage.ua/ua/news/u-serpni-2023-cina-hlibu-v-ukrayini-zrosla-na-10-20percent (дата звернення: 14.03.2024).
4. Goucher, L., Bruce, R., Cameron, D. D., Lenny Koh, S. C., & Horton, P. (2017). The environmental impact of fertilizer embodied in a wheat-to-bread supply chain. Nature Plants, 3, 17012. https://doi.org/10.1038/nplants.2017.12
5. Названо найкорисніший хліб. 2024.: URL: https://gazeta.ua/articles/health/_nazvali-najkorisnishij-hlib/1168590 (дата звернення: 18.03.2026).
6. Espinoza-Orias, N., Stichnothe, H., & Azapagic, A. (2011). The carbon footprint of bread. The International Journal of Life Cycle Assessment, 16, 351–365. https://doi.org/10.1007/s11367-011-0271-0
7. Ліщинська В. В. Аналіз конкурентного середовища хлібопекарської промисловості України. *Ефективна економіка.* 2018. Т. 4. URL: http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/4_2018/163.pdf (дата звернення: 04.03.2024).
8. Notarnicola, B., Tassielli, G., Renzulli, P. A., Castellani, V., & Sala, S. (2017). Environmental impacts of food consumption in Europe. Journal of Cleaner Production, 140, 753–765. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.080
9. Поторак В. Визначення критеріїв розвитку в умовах сьогодення. URL: https://decide.in.ua/uavsi-publikacziyi/ (дата звернення: 12.03.2026).

10. Бровкіна Ю.О. Вплив факторів зовнішнього середовища на економічну безпеку хлібопекарських підприємств. Глобальні та національні проблеми економіки. 2015. Вип. 4. С. 316-319 URL: http://global-national.in.ua/archive/4-2015/66.pdf (дата звернення: 18.03.2026).
11. Гайдичук В.С. Хліб – сучасні погляди на виживання. 2026.: URL: https://cn.cdc.gov.ua/news/hlib-suchasni-poglyady-na-vzhyvannya/ (дата звернення: 18.03.2026).
12. Внесення змін в порядок організації харчування у закладах освіти та дитячих закладах оздоровлення та відпочинку, постанова КМУ 08.10.2025 р. №1280. URL: https://znaimo.gov.ua/pro-vnesennia-zmin-do-postanovy-kabinetu-ministriv-ukrainy-vid-24-bereznia-2021-r-o-305 (дата звернення: 12.03.2026).
13. Близько 20% хлібозаводів зруйновані або не повернулися до виробництва: вебсайт. URL: https://agroportal.ua/news/eksklyuzivy/blizko-20-hlibozavodiv-zruynovani-abo-ne-povernulisya-do-virobnictva (дата звернення: 05.03.2026).
14. Свистун М. Чому хліб такий важливий в українській культурі. Пояснити Україну. 2026.: URL: https://explain.org.ua/posts/16-chomu-hlib (дата звернення: 18.03.2026).
15. Офіційний сайт «Державна служба статистики України». Обсяг реалізованої промислової продукції за видами діяльності: вебсайт. URL: https://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2007/pr/orp/orp_u/arh_orp_u.html (дата звернення: 05.03.2026).
16. Закон України «Про збір та облік єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування» із змінами та доповненнями. URL: http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2464-17 (дата звернення: 01.03.2026).
17. Хліб на кожен день: від традиції до іновацій. 2026.: URL: http://petropavlivka.city/articles/351905/hlib-na-kozhen-den-vid-tradicii-do-innovacij (дата звернення: 01.03.2026).
18. Статичний аналіз ринку заморожених продуктів. URL: http://www.radakmu. org.ua/file/zvit_Bartkovskogo.doc (дата звернення: 12.03.2026).
19. Ротай Н. Коли хліб стає отрутою. 2007.: URL: https://umoloda.kyiv.ua/number/1047/218/37663/ (дата звернення: 18.03.2026).
20. Концепція Загальнодержавної програми «Здоров'я – 2020: український вимір» затверджено. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 31 жовтня 2011 р. № 1164-р «Про схвалення Концепції Загальнодержавної програми «Здоров'я 2020: український вимір». URL: http://www.apteka.ua/article/107842 (дата звернення: 25.03.2026).
21. Басюк В.Ю., Клешня Я.О. Вплив нестабільності зовнішнього середовища на підприємства хлібопекарської галузі. 2024: V Міжнародна науково-практична конференція "БІЗНЕС, ІННОВАЦІЇ, МЕНЕДЖМЕНТ: ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ" Секція 1. Тенденції розвитку бізнесу та менеджменту. URL: https://confmanagement-proc.kpi.ua/article/view/303592 (дата звернення: 01.03.2026).
22. Енергетична стратегія України на період до 2030 року. URL: http://mpe.kmu.gov.ua/fuel/control/uk/doccatalog/list?currDir=50358 (дата звернення: 26.03.2026).
23. Новойтенко І. В., Малиновський В. В. Стан та основні тренди розвитку хлібопекарської промисловості України. Ефективна економіка. 2020. №. 11. URL: http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/11_2020/54.pdf (дата звернення: 26.03.2026).
24. Міністерство охорони здоров'я України. Державні санітарні правила і норми «Максимально допустимі рівні окремих забруднюючих речовин у харчових продуктах»: наказ МОЗ України від 13.05.2013 № 368 (у редакції наказу МОЗ України від 22.05.2020 № 1238). URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/z0774-13 (дата звернення: 18.03.2026).
25. Міністерство охорони здоров'я України. Державні гігієнічні нормативи «Допустимі рівні вмісту радіонуклідів 137Cs та 90Sr у продуктах харчування та питній воді»: наказ МОЗ України від 03.05.2006 № 256. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/z0845-06 (дата звернення: 18.03.2026).
26. Державні санітарні правила та норми ДСанПіН 8.8.1.2.3.4-000-2001. Допустимі дози, концентрації, кількості та рівні вмісту пестицидів у сільськогосподарській сировині, харчових продуктах, повітрі робочої зони, атмосферному повітрі, воді водоймищ, ґрунті. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/v0137588-01 (дата звернення: 18.03.2026).
27. ДСТУ 7517:2024. Хліб із пшеничного борошна. Загальні технічні умови. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=112017 (дата звернення: 18.03.2026).
28. ДСТУ 4583:2023. Хліб із житнього та суміші житнього і пшеничного борошна. Загальні технічні умови. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=104866 (дата звернення: 18.03.2026).
29. Міністерство охорони здоров'я України. Вимоги до харчових добавок: наказ МОЗ України від 08.01.2024 № 45. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/z0120-24 (дата звернення: 18.03.2026).
30. Міністерство охорони здоров'я України. Вимоги до харчових ензимів: наказ МОЗ України від 08.01.2024 № 45. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/z0121-24 (дата звернення: 18.03.2026).
31. Про інформацію для споживачів щодо харчових продуктів: Закон України від 06.12.2018 № 2639-VIII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/2639-19 (дата звернення: 18.03.2026).

Стаття надійшла до редакції 10.04.2026 Переглянуто 11.05.2026
Стаття рекомендована до друку 19.05.2026 Опубліковано 30.05.2026

K. B. NECHEPURENKO, PhD (Technics)
Associate Professor of the Department of Hotel, Restaurant Business and Craft Technologies
e-mail: krystyna.nechepurenko@hneu.net ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-1815-2542
Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics,
9a, Nauky Ave., Kharkiv, 61165, Ukraina

ECOLOGICAL AND ECONOMIC ASPECTS OF THE FUNCTIONING OF THE BAKERY INDUSTRY IN KHARKIV REGION UNDER CURRENT CHALLENGES

Purpose. To identify the ecological and economic features of the bakery industry in Kharkiv region by analyzing production dynamics, sales channels, logistics, storage conditions, packaging and safety indicators of bakery products, and by outlining practical measures to improve resource efficiency and environmental safety.

Methods. The research is based on systematic, comparative, statistical-analytical and structural-logical methods. Production and sales statistics were used to assess ecological and economic trends, while the production and sales chain was examined through the sequence "production - storage - packaging - transportation - sale". This made it possible to distinguish resource-related, logistics, sanitary-hygienic and waste-generating factors.

Results. The study shows that the environmental dimension of the bakery industry is formed throughout the product chain, from the use of raw materials, energy and water to packaging, delivery, storage and sale. The main factors include energy and water consumption, sanitary treatment of equipment and vehicles, short shelf life, generation of organic and packaging waste, and the need for regular road transportation. The reduction in specialized bakery retail outlets may affect product accessibility, complicate distribution planning and contribute to finished product losses and food waste; the actual effect on transport burden requires a separate assessment based on freight turnover, trip frequency and route length.

Conclusions. The environmental improvement of the bakery industry in Kharkiv region requires coordinated technological, logistics and retail measures. Priority directions include energy-efficient equipment, rational water use, optimized delivery routes, reduced losses of unsold products, safe and recyclable packaging, stronger control of raw material and finished product safety indicators, and the introduction of environmental management elements at bakery enterprises.

KEY WORDS: *environmental safety, bakery industry, resource efficiency, food waste, packaging materials*

Conflict of Interest

The author declares no conflict of interest regarding the publication of this manuscript. Furthermore, the author has fully adhered to ethical norms, including avoiding plagiarism, data falsification, and duplicate publication.

AI Statement

During the preparation of the manuscript, the artificial intelligence tool ChatGPT (OpenAI, 2026) was used for language editing, structural organization of individual fragments, and increasing the text's compliance with the requirements of a scientific publication. The scientific statements, factual data, interpretations, and conclusions were checked by the author, who bears full responsibility for the content of the manuscript.

References

1. Berendii, Yu. (2024). It will stay fresh for many times longer: what to do with bread immediately after purchase Retrieved from https://glavred.net/life/budet-svezhim-v-razy-dolshe-chto-srazu-nuzhno-sdelat-s-hlebom-posle-pokupki-10579502.html (in Ukrainian)
2. State Statistics Service of Ukraine. *Official website*. Retrieved from http://www.ukrstat.gov.ua/ (in Ukrainian)
3. *The price of bread is rising in Ukraine: what is the reason for this?* Retrieved from https://thepage.ua/ua/news/u-serpni-2023-cina-hlibu-v-ukrayini-zrosla-na-10-20percent (in Ukrainian)
4. Goucher, L., Bruce, R., Cameron, D. D., Lenny Koh, S. C., & Horton, P. (2017). The environmental impact of fertilizer embodied in a wheat-to-bread supply chain. *Nature Plants*, 3, 17012. https://doi.org/10.1038/nplants.2017.12
5. *The most useful bread has been named.* (2024). Retrieved from https://gazeta.ua/articles/health/_nazvali-naj-korisnishij-hlib/1168590 (in Ukrainian)
6. Espinoza-Orias, N., Stichnothe, H., & Azapagic, A. (2011). The carbon footprint of bread. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16, 351–365. https://doi.org/10.1007/s11367-011-0271-0
7. Lishchynska, V. V. (2018). Analysis of the competitive environment of the Ukrainian bakery industry.*Efficient economy.4*. Retrieved from http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/4_2018/163.pdf (in Ukrainian)
8. Notarnicola, B., Tassielli, G., Renzulli, P. A., Castellani, V., & Sala, S. (2017). Environmental impacts of food consumption in Europe. *Journal of Cleaner Production*, 140, 753–765. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.080

9. Potorak, V. Determination of development criteria in the present conditions. Retrieved from https://decide.in.ua/uavsi-publikacziyi/ (in Ukrainian)
10. Brovkina, Yu. O. (2015). The influence of environmental factors on the economic security of bakery enterprises. *Global and national problems of the economy*, 4, 316–319. http://global-national.in.ua/archive/4-2015/66.pdf (in Ukrainian)
11. Haidychuk, V. S. (2026). Bread - modern views on survival. Retrieved from https://cn.cdc.gov.ua/news/hlib-suchasni-poglyady-na-vzhyvannya/ (in Ukrainian)
12. Amendments to the procedure for organizing food in educational institutions and children's health and recreation facilities, Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 08.10.2025 No. 1280. (2025). Cabinet of Ministers of Ukraine. Retrieved from https://znaimo.gov.ua/pro-vnesennia-zmin-do-postanovy-kabinetu-ministriv-ukrainy-vid-24-bereznia-2021-r-o-305 (in Ukrainian)
13. *About 20% of bread factories were destroyed or did not return to production.* Retrieved from https://agroportal.ua/news/eksklyuzivy/blizko-20-hlibozavodiv-zruynovani-abo-ne-povernulisya-do-virobnictva (in Ukrainian)
14. Svystun, M. (2026). Why is bread so important in Ukrainian culture. Explain Ukraine. Retrieved from https://explain.org.ua/posts/16-chomu-hlib (in Ukrainian)
15. Volume of industrial products sold by type of activity. Official website of the State Statistics Service of Ukraine. Retrieved from https://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2007/pr/orp/orp_u/arh_orp_u.html (in Ukrainian)
16. Law of Ukraine "On the Collection and Accounting of a Single Contribution for Compulsory State Social Insurance" with amendments and supplements. Retrieved from http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2464-17 (in Ukrainian)
17. Bread for Every Day: From Tradition to Innovation. (2026). Retrieved from https://petropavlivka.city/articles/351905/hlib-na-kozhen-den-vid-tradicii-do-innovacij (in Ukrainian)
18. Static analysis of the frozen food market. Retrieved from http://www.radakmu.org.ua/file/zvit_Bartkovskogo.doc (in Ukrainian)
19. Rotay, N. (2007). When bread becomes poison. Retrieved from https://umoloda.kyiv.ua/number/1047/218/37663/ (in Ukrainian)
20. The concept of the National Program "Health – 2020: Ukrainian dimension" has been approved. Approved by the order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated October 31, 2011 No. 1164-r (2011. Cabinet of Ministers of Ukraine. Retrieved from http://www.apteka.ua/article/107842 (in Ukrainian)
21. Basiuk, V. Yu., & Kleshnia, Ya. O. (2024). The impact of environmental instability on enterprises of the bread and bakery industry. 2024: V International Scientific and Practical Conference "BUSINESS, INNOVATIONS, MANAGEMENT: PROBLEMS AND PROSPECTS" Section 1. Trends in the development of business and management. Retrieved from https://confmanagement-proc.kpi.ua/article/view/303592 (in Ukrainian)
22. Energy Strategy of Ukraine for the period until 2030. Retrieved from http://mpe.kmu.gov.ua/fuel/control/uk/doccatalog/list?currDir=50358 (in Ukrainian)
23. Novoitenko, I. V., & Malynovsky, V. V. (2020). State and main trends of development of the bakery industry of Ukraine. *Effective economy*, 11. Retrieved from http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/11_2020/54.pdf (in Ukrainian)
24. State Sanitary Rules and Norms "Maximum Permissible Levels of Certain Pollutants in Food Products": Order of the Ministry of Health of Ukraine dated 13.05.2013 No. 368 (as amended by Order of the Ministry of Health of Ukraine dated 22.05.2020 No. 1238). (2020). Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/go/z0774-13 (in Ukrainian)
25. State Hygienic Standards "Permissible Levels of Radionuclides 137Cs and 90Sr in Food and Drinking Water": Order of the Ministry of Health of Ukraine dated 03.05.2006 No. 256. (2006). Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/go/z0845-06 (in Ukrainian)
26. State sanitary rules and norms DSanPiN 8.8.1.2.3.4-000-2001. Permissible doses, concentrations, quantities and levels of pesticides in agricultural raw materials, food products, workplace air, ambient air, surface waters and soil. Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/go/v0137588-01 (in Ukrainian)
27. .DSTU 7517:2024. Wheaten bread. General specifications. Retrieved from https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=112017 (in Ukrainian)
28. . Bread from rye flour and mixtures of rye and wheat flour. General specifications. DSTU 4583:2023Retrieved from https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=104866 (in Ukrainian)
29. Requirements for food additives: Order No. 45 of January 8, 2024. (2024). Ministry of Health of Ukraine. Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/go/z0120-24 (in Ukrainian)
30. Requirements for food enzymes: Order No. 45 of January 8, 2024. (2024). Ministry of Health of Ukraine. Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/go/z0121-24 (in Ukrainian)
31. "On information for consumers regarding food products" No. 2639-VIII of December 6, 2018. (2018). Law of Ukraine Verkhovna Rada of Ukraine. Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/go/2639-19 (in Ukrainian)

The article was received by the editors 10.04.2026 The article was revised 11.05.2026
The article is recommended for printing 19.05.2026 This article published 30.05.2026

ЕКОЛОГІЧНА ТА ПРИРОДООХОРОННА ОСВІТА

https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-16
УДК 372.3:504.03

А. Н. НЕКОС[1], д-р географ. наук, проф.,
професор кафедри екологічного моніторингу та заповідної справи
e-mail: nekos@karazin.ua ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-1852-0234

С. Д. УВАРОВА[1],
бакалавр
e-mail: sofiia.uvarova@student.karazin.ua ORCID ID: https://orcid.org/0009-0007-0384-1074

А. Ю. ШАБАЛІН[1],
магістр
e-mail: anna.shabalin@student.karazin.ua ORCID ID: https://orcid.org/0009-0008-1772-5549

[1]*Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,*
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ЕКОЛОГІЧНОЇ ОСВІТИ ДЛЯ ДІТЕЙ ДОШКІЛЬНОГО ВІКУ

Мета. Визначити сучасний стан екологічного виховання дітей дошкільного віку в Україні та запропонувати комплекс методичних розробок для закладів дошкільної освіти і сімейного виховання.

Методи. Системний та порівняльний аналіз змісту та якості дошкільної екологічної освіти, соціологічні методи дослідження, метод атомно-абсорбційної спектрометрії як приклад наочного та практичного навчання

Результати. Порівняння підходів до дошкільної екологічної освіти у Німеччині, США, Англії, Японії та Швеції визначило, що ефективна дошкільна екологічна освіта спирається насамперед на безпосередній досвід дитини у природному середовищі, а не на ізольоване засвоєння теоретичних відомостей. Шведська модель «лісових шкіл» розглядається у дослідженнях як дієвий спосіб розвитку самостійності, соціальної взаємодії та відповідального ставлення до довкілля. Онлайн-опитування батьків дошкільнят з Запоріжжя, Ужгорода, Вінниці, Полтави, Львова, Києва та Харкова виявило суттєвий розрив між установками й діями батьків: більшість визнають важливість екологічного виховання дошкільнят; трохи більше половини звертаються до екологічної тематики; зовсім незначна кількість батьків систематично долучаються до екологічних заходів; у домашній практиці екологічного виховання переважають бесіди, тоді як виконання практичних дослідів та спільних екологічних проєктів батьками використовується значно менше. Спектрометричний аналіз визначення вмісту важких металів у рослинній продукції, виконаний під час демонстрації практичних робіт, засвідчив вдалий підхід до візуалізації для дітей дослідницької діяльності. Запропонований методичний цикл містить 8 розробок для дітей 3-7 років.

Висновки. Період дошкільного дитинства є ключовим для формування первинних екологічних уявлень, емоційно-ціннісного ставлення до природи та навичок екологічно доцільної поведінки. Практична діяльність у природі має розглядатися як базовий компонент освітнього процесу, а не як епізодичне доповнення. Недостатність адаптованих методичних матеріалів і слабка участь родин взаємно посилюють одна одну, тому потребують комплексного педагогічного вирішення. Запропонований методичний цикл урахує вікові особливості дошкільнят і може бути застосований як у закладах дошкільної освіти, так і в родинному вихованні.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *дошкільна екологічна освіта, екологічне виховання, методичні матеріали, соціологічне опитування, екологічний світогляд, сталий розвиток*

Як цитувати: Некос А. Н., Уварова С. Д., Шабалін А. Ю. Особливості екологічної освіти для дітей дошкільного віку. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2026. Вип. 34. С. 207-220. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-16

In cites: Nekos, A. N., Uvarova S. D., & Shabalin A. Y. (2026). Features of environmental education for preschool children. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology,* (34), 207-220. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-16 (in Ukrainian)

© Некос А. Н., Уварова С. Д., Шабалін А. Ю., 2026
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0

Вступ

Кліматичні зміни, втрата біорізноманіття, виснаження ґрунтових ресурсів і забруднення водних об'єктів уже не сприймаються лише як віддалені наукові проблеми. Вони безпосередньо впливають на умови життя людини, якість харчових продуктів, стан здоров'я населення та безпеку майбутніх поколінь. Водночас витоки багатьох екологічних ризиків пов'язані не тільки з виробництвом, а й із повсякденними моделями поведінки, що починають формуватися в ранньому дитинстві. Саме тому дошкільний вік у сучасній педагогіці розглядається як особливо чутливий період для становлення уявлень про природу, відповідальність людини перед довкіллям і власну участь у його збереженні.

Проблематика екологічного виховання дошкільнят посідає помітне місце у вітчизняних і зарубіжних науково-методичних дослідженнях. В Україні зміст екологічних уявлень, особливості природничого розвитку дітей і методи формування екологічної культури аналізували Г. В. Бєлєнька, Н. М. Горопаха, Репета С. Р., Джура Н. М. та інші дослідники [1, 2, 3, 4]. У зарубіжній традиції значний інтерес становлять праці Л. О'Браєн та Р. Мюррея, у яких обґрунтовано результативність шведської моделі «лісових шкіл» для розвитку самостійності, комунікативності та дослідницької активності дошкільнят [5, 6]. Попри наявність теоретичних напрацювань, практичний інструментарій для педагогів і батьків залишається недостатньо систематизованим [7].

Для України ця проблема має особливу актуальність. Концепція безперервної екологічної освіти, затверджена у 2001 році (за редакцією від 01.01.2026), визначає дошкільну ланку початковим етапом формування екологічної культури [8]. Оновлений Базовий компонент дошкільної освіти також орієнтує педагогів на розвиток природничо-екологічного виховання дітей [9]. Однак на практиці системність такої роботи нерідко залежить від особистої ініціативи вихователя, рівня методичної підготовки закладу та готовності родини підтримувати екологічні звички дитини поза межами освітнього середовища [10].

З огляду на це дослідження спрямовано на поєднання аналітичного, соціологічного, експериментального й методичного компонентів. Також важливість дослідження полягає у визначенні реального стану екологічного виховання дошкільнят в Україні, з'ясуванні чинників, що обмежують його практичну результативність, і створенні апробованого циклу матеріалів для педагогів та батьків. Для визначення результативності виконаних авторських розробок розглянуто вітчизняний і міжнародний досвід дошкільної екологічної освіти, проведено опитування батьків, виконано демонстраційне лабораторне дослідження та підготовлено методичні розробки для різних вікових груп.

Методи

Об'єктом дослідження виступає дошкільна екологічна освіта в Україні. Предметом є форми її реалізації в закладах дошкільної освіти та в сімейному вихованні. Опрацьовано науково-методичні публікації та нормативно-правові документи, що регламентують екологічну освіту дітей дошкільного віку. Виконано порівняльний аналіз моделей екоосвіти, що застосовуються у Німеччині, США, Англії, Японії та Швеції і співставити їх з українськими підходами.

Соціологічні методи дослідження за допомогою Google Форми щодо опитування батьків дошкільнят надали можливість використати онлайн-формат, забезпечивши оперативність збору даних і охоплення родин із різних регіонів країни. Анкету поширено через батьківські чати у месенджерах – тематичні групи, де учасники спілкуються з повсякденних питань виховання дошкільнят. Адміністратор однієї з найбільших таких груп розмістив оголошення з посиланням на Google Форму та проханням взяти участь в опитуванні. Ттака модель відбору формує невипадкову вибірку – респонденти є активними користувачами соціальних мереж, що може впливати на рівень їхньої обізнаності та залученості до питань екологічного виховання.

Результати відображають життєво важливі установки цієї аудиторії і не претендують на статистичну репрезентативність для всього населення України. Запропоновано цикл з 8 методичних розробок для екологічної просвіти дітей 3-7 років [7]. Практичні лабораторні досліди виконані методом атомно-абсорбційної спектрометрії на приладі МГА 915 МД.

Результати дослідження

Закордонний досвід дошкільної екологічної освіти. Порівняння міжнародних підходів показало, що успішні системи дошкільної екологічної освіти ґрунтуються на спільному принципі. Дитина має не лише чути про природу, а й діяти в ній, спостерігати зміни, доглядати рослини, взаємодіяти з природними об'єктами та робити прості висновки з власного досвіду. Відмінності між країнами стосуються насамперед організаційних форм, тоді як діяльнісний характер навчання залишається визначальним.

У Швеції традиція навчання дітей у природному середовищі має понад сімдесятирічну історію. Методика «лісових шкіл», започаткована Ґостою Фрохмом у 1950-х роках, передбачає регулярне перебування дошкільнят просто неба, де навчання відбувається через гру, спостереження, дослідження і спільну діяльність [11, 12]. Дослідження Л. О'Браєн та Р. Мюррея, виконане у 2005 році у Великій Британії, засвідчило позитивний вплив такої практики на самостійність, соціальні навички та навчальну мотивацію дітей [5,6]. Надалі подібні підходи поширилися за межі Скандинавії [13, 14]. Наприклад, у США діють понад 250 природничих дошкільних закладів, організованих за близькою логікою [15, 16].

Японська модель має інше культурне підґрунтя, але також виходить із необхідності щоденного контакту дитини з живою природою. При багатьох дитячих садках облаштовують невеликі сади й городи, де вихованці вирощують рослини, спостерігають за їхнім розвитком і набувають досвіду догляду. Шанобливе ставлення до природи, пов'язане із синтоїстськими та буддійськими уявленнями, органічно підтримує освітню практику. Створення у 1990 році Інституту екологічної освіти сприяло методичній координації цього напряму та накопиченню відповідного педагогічного досвіду [17].

У Німеччині вагоме місце посідає створення «зеленого середовища» безпосередньо на території закладів дошкільної освіти. Діти залучаються до озеленення, вирощування рослин, спостереження за сезонними змінами та елементарних природничих досліджень. В Англії екологічна тематика інтегрується в освітні програми дошкільної та початкової ланок як обов'язковий компонент, а не як разова виховна акція [18]. Окрему нішу у зарубіжній практиці займають спеціалізовані заклади з авторськими методиками на зразок монтессорі-садків, де навчання організоване у тематичних зонах – як у спеціально обладнаних кімнатах, так і просто неба. У таких закладах поглиблена взаємодія з природним середовищем є не епізодичним заходом, а структурним елементом щоденного освітнього процесу.

До аналізу стану екологічної освіти залучено положення Концепції безперервної екологічної освіти в Україні (2001, за редакцією від 01.01.2026) та Базового компонента дошкільної освіти в Україні (2021) [8, 9]. Вітчизняна наукова думка щодо екологічного виховання дошкільнят представлена широким колом досліджень. Г. В. Бєлєнька, Т. С. Науменко та О. В. Половіна доводять, що основи екологічної свідомості закладаються у дошкільному дитинстві через безпосередній чуттєвий досвід взаємодії з природою, а еколого-природнича компетентність дошкільника охоплює три взаємозалежні компоненти – когнітивний, емоційно-ціннісний і діяльнісно-практичний [1]. Н. М. Горопаха обґрунтувала, що якість екологічного виховання в закладі безпосередньо залежить від спеціально організованого еколого-розвивального середовища, яке стимулює дітей до спостереження, дослідження та природодоцільної поведінки [2]. С. Р. Репета та Н. М. Джура систематизували наукові підходи до організації екологічного виховання і встановили, що робота з дошкільнятами має охоплювати три напрями – інтелектуальний, особистісний і внутрішню готовність до природоохоронних дій [3]. С. А. Іванчук проаналізував еволюцію базових понять екологічного виховання і встановив, що сучасна педагогіка здійснює перехід від антропоцентричної до екоцентричної парадигми, де головною метою стає виховання екологічно доцільної поведінки особистості [4]. Спільним висновком цих досліджень є визнання дошкільного дитинства сенситивним і пріоритетним етапом для формування основ екологічного світогляду [7].

Отже, міжнародний досвід підтверджує перевагу діяльнісної моделі над суто

вербальним ознайомленням із природою. Для українських закладів дошкільної освіти цей висновок є особливо важливим, оскільки в реальній практиці екологічне виховання часто обмежується бесідами, читанням і демонстраційними матеріалами, тоді як саме безпосередня участь дитини у природоохоронних діях і дослідженнях природи формує стійкі навички.

Результати соціологічного опитування. У січні 2025 року було проведено соціологічне дослідження з опитуванням батьків щодо екологічної освіти дошкільнят. Зібрано відповіді від 136 респондентів з різних міст України: Запоріжжя, Ужгорода, Вінниці, Полтави, Львова, Києва та Харкова. Анкета містила 11 запитань закритого й напівзакритого типу. Тематика стосувалась способів екологічного виховання у родині, тем спілкування з дітьми, використання практичних методів і рівня участі батьків у природоохоронних заходах. Результати опитування батьків засвідчили помітну невідповідність між позитивним ставленням до екологічного виховання дошкільнят та рівнем його практичного втілення в родинах. Оскільки респонденти представляли 7 міст України, отримані результати можна розглядати як показовий зріз батьківських установок і типових домашніх практик, не ототожнюючи його з повною статистичною репрезентативністю для всієї країни. На рис.1 представлена діаграма, побудована за результатами опитування батьків щодо визначення зацікавленості дитини природою та тваринами.

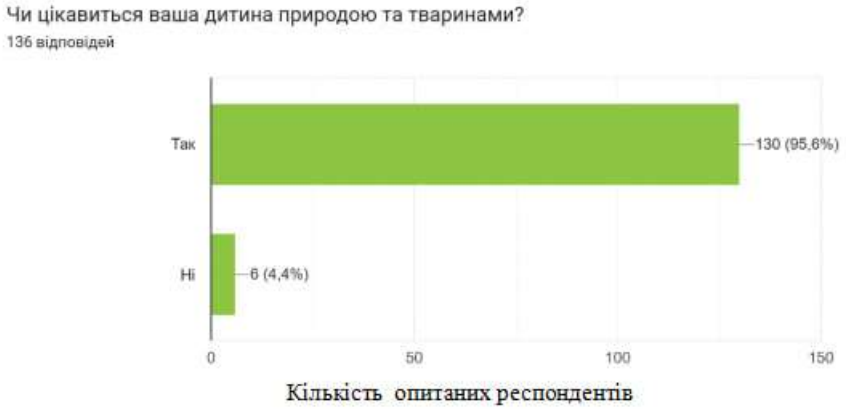


Рис. 1 – Результати визначення зацікавленості дитини природою та тваринами

Fig. 1 – Results of determining a child's interest in nature and animals

Перше запитання анкети було спрямоване на з'ясування природного інтересу дітей до живого світу. Позитивну відповідь дали 95,6 % респондентів, тоді як 4,4 % зазначили відсутність такого інтересу. Цей результат підтверджує, що в дошкільному віці існує потужна емоційна основа для екологічного виховання. Дитяча допитливість щодо рослин, тварин і явищ природи виникає раніше, ніж системні знання, тому педагогічне завдання полягає в тому, щоб підтримати цей інтерес і поступово перевести його у відповідальні дії.

За результатами опитування батьків про їх просвітницьку діяльність дітлахів (рис.2) визначено, що дитячу літературу еколого-природничого змісту використовують 82,2 % батьків, що робить читання одним із найпоширеніших способів домашнього екологічного виховання. Книжка є доступним засобом первинного ознайомлення дитини з живим світом, однак вона переважно забезпечує інформаційне й емоційне сприйняття, а не практичну взаємодію. Тому високий показник читання на тлі значно нижчої частки дослідів і проєктів засвідчує домінування пасивно-вербальних форм роботи.

Хоча більшість батьків визнає важливість екологічної тематики (рис.3), регулярно обговорюють її з дітьми лише 68,4 % родин. Отже, приблизно кожна третя сім'я не включає такі питання до повсякденного спілкування. Причинами можуть бути дефіцит часу, невпевненість дорослих у власній обізнаності або хибне уявлення про складність екологічних понять для дошкільного віку. Водночас базові уявлення про воду, повітря, рослини, тварин і відходи діти успішно

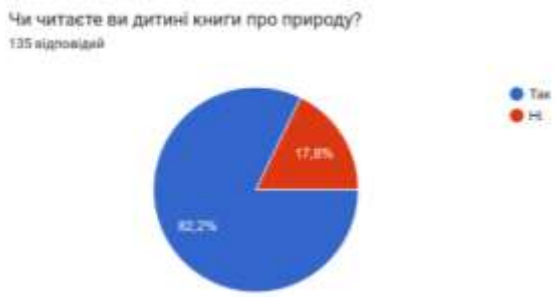


Рис. 2 – Ознайомлення дітей з природою за допомогою літератури

Fig. 2 – Introducing children to nature through literature

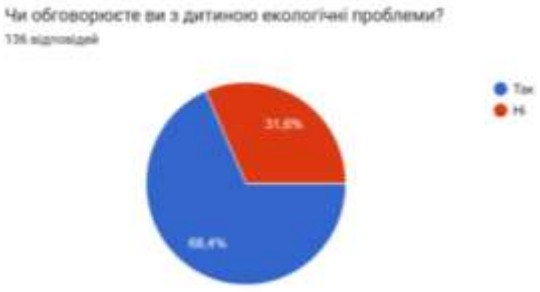


Рис. 3 – Значущість екологічних тем у родинах

Fig. 3 – The importance of environmental topics in families

засвоюють через конкретні життєві ситуації та наочні приклади.

Розподіл відповідей щодо методів домашнього виховання (рис.4) демонструє виразну перевагу словесних форм над діяльнісними. Бесіди використовують 88,2 % батьків, екологічні ігри – 46,3 %, екскурсії – 35,3 %, практичні досліди – 30,1 %. Найменш поширеними виявилися спільні екологічні проєкти, до яких залучають дітей лише 5,9 % родин. Саме досліди й проєкти мають найвищий потенціал для формування особистого досвіду екологічно відповідальної поведінки, однак вони потребують від дорослих попередньої підготовки, часу та методичної впевненості. Це узгоджується з висновками зарубіжних авторів про переважання вербальних методів за відсутності належного практичного супроводу [10].

Звісно, що саме батькам повинні належати перші кроки у опануванні екологічних знань.



Рис. 4 – Методи екологічного виховання у родинному середовищі

Fig. 4 – Methods of environmental education in the family

Стійкий інтерес до екологічних тем, за відповідями батьків (рис.5), виявляють 64 % дошкільнят. Цей показник нижчий за загальну зацікавленість природою, яка становить 95,6 % (рис.1). Різниця майже у 32 відсоткові пункти свідчить, що природна допитливість дитини не перетворюється автоматично на усвідомлений екологічний інтерес. Для цього потрібні систематичні спостереження, ігрові завдання, практичні досліди, участь у догляді за рослинами, сортуванні відходів та інших доступних діях. До роздільного збирання відходів (рис.6) у домашніх умовах дітей залучають 37,5 % батьків, тоді як 62,5 % цього не практикують.

Сортування сміття є одним із найбільш доступних способів формування екологічної поведінки, оскільки може виконуватися у звичайному побутовому середовищі й не потребує складного обладнання. Низький рівень участі дошкільнят у такій діяльності може бути пов'язаний як із недостатньою інфраструктурою, так і з тим, що самі дорослі не завжди мають сталу звичку до

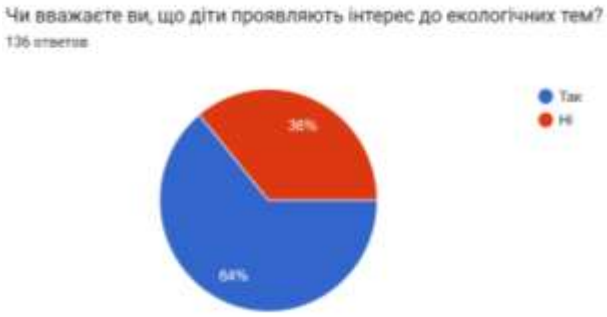


Рис. 5 – Зацікавленість дітей екологічними темами

Fig. 5 – Children's interest in environmental topics

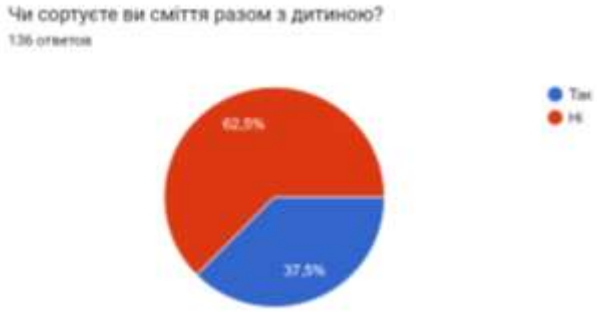


Рис. 6 – Залученість дітей до розв'язання проблеми утилізації сміття

Fig. 6 – Children's involvement in solving the problem of waste disposal

роздільного збору відходів. У результаті дитина частіше чує про екологічну проблему, ніж бере участь у її практичному вирішенні. Про саму екологічну активність батьків відповіді розподілилися (рис.7): регулярну участь в екологічних заходах підтвердили лише 22,8 % родин; 77,2 % респондентів не долучаються до таких активностей на постійній основі. Цей показник є особливо показовим, оскільки відображає не декларативне ставлення, а реальні дії.

Порівняння з часткою батьків, які визнають важливість екологічного виховання, виявляє суттєвий розрив між ціннісною установкою і поведінковою практикою. Подібна невідповідність описується і в зарубіжних дослідженнях: екологічна обізнаність не завжди переходить у дію без підтримки освітніх інституцій, зручної інфраструктури та зрозумілих методичних рішень [19, 20]. Наскільки важлива екологічна просвіта дошкільнят показано на рис.8.

Окремий блок анкети стосувався оцінки значущості екологічного виховання саме у дошкільному віці. Позитивну відповідь надали 95,6 % респондентів. Це свідчить про те, що батьки загалом усвідомлюють важливість раннього формування екологічної культури у дітей.

Однак зіставлення цього результату з попередніми показниками демонструє, що само по собі усвідомлення проблеми не гарантує наявності регулярних екопрактик у родині будь-якого роду.

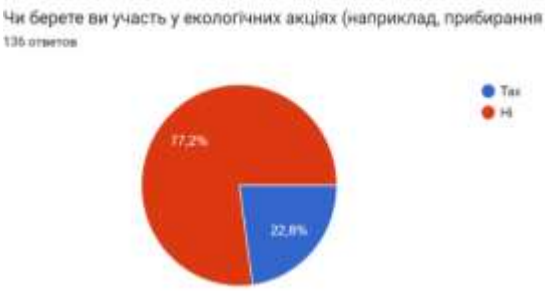


Рис. 7 – Результати опитування щодо екологічної активності батьків дошкільників

Fig. 7 – Results of a survey on the environmental activity of parents of preschoolers

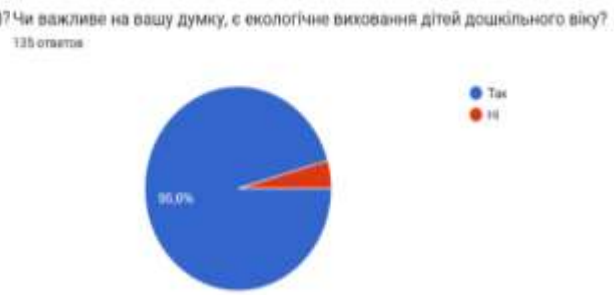


Рис. 8 – Актуальність екологічної освіти дошкільнят

Fig. 8 – Relevance of environmental education of preschoolers

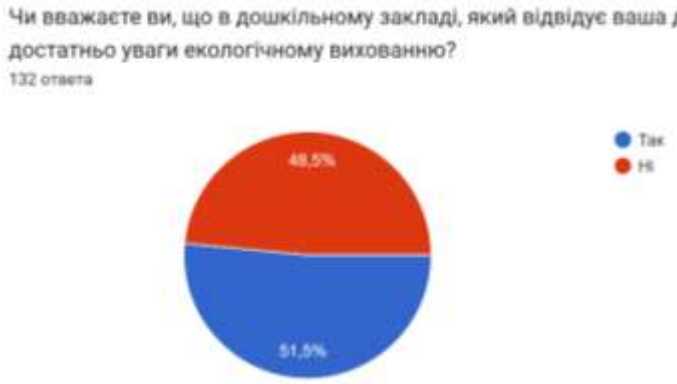


Рис. 9 – Оцінювання батьками якості екологічної освіти у закладах дошкільної освіти

Fig. 9 – Parents' assessment of the quality of environmental education in preschool institutions

Думки батьків щодо якості екологічної освіти у дошкільних закладах розподілились майже по-рівну (Рис.9).

Оцінки батьків щодо формування екологічного світогляду дітей у дітсадках розподілилися як 51,5 % вважають, що садочок приділяє цьому напряму достатньо уваги, а 48,5 % мають протилежну думку. Такий результат свідчить про нерівномірність організації екологічного виховання у дошкільних закладах. Значною мірою якість роботи залежить від рівня підготовленості та ініціативи самого вихователя, наявності матеріальної бази та доступних методичних сценаріїв.

Майже половина критичних оцінок з боку батьків підтверджує потребу в актуалізації, розширенні й уніфікації програмного і методичного забезпечення екопросвіти. І це підтверджується відповідями батьків (Рис.10).

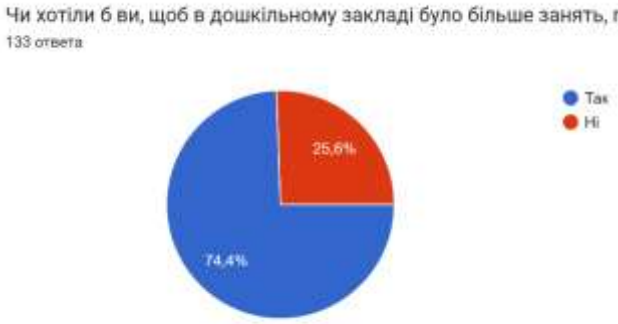


Рис. 10 – Зацікавленість батьків у розширенні екологічної освіти дітей у закладах дошкільної освіти

Fig. 10 – Parents' interest in expanding children's environmental education in preschool institutions

Бажання бачити більше занять екологічного спрямування у дошкільному закладі висловили 74,4 % опитаних; 25,6 % вважають наявний обсяг достатнім. Це один із ключових результатів опитування, оскільки він фіксує не лише оцінку поточного стану, а й соціальний запит на зміни. Отже, розробка доступних, віково адаптованих і практично зорієнтованих методичних матеріалів відповідає очікуванням як вихователів, так і батьківської аудиторії. Відповіді на питання про популярність екологічних заходів у батьківському середовищі продемонстровані на діаграмі рис.11, що може викликати занепокоєння.

Участь батьків в екологічних заходах, які організовує дошкільний заклад, залишається обмеженою. Ніколи не беруть участі 27,8 % респондентів, рідко – 29,3 %, час від часу – 32,3 %. Часто долучаються 7,5 %, дуже часто – 4,5 %. Отже, понад половина опитаних фактично перебуває на периферії екологічної діяльності закладу. Це означає, що дошкільним установам необхідні не лише методичні розробки і сценарії занять екологічного

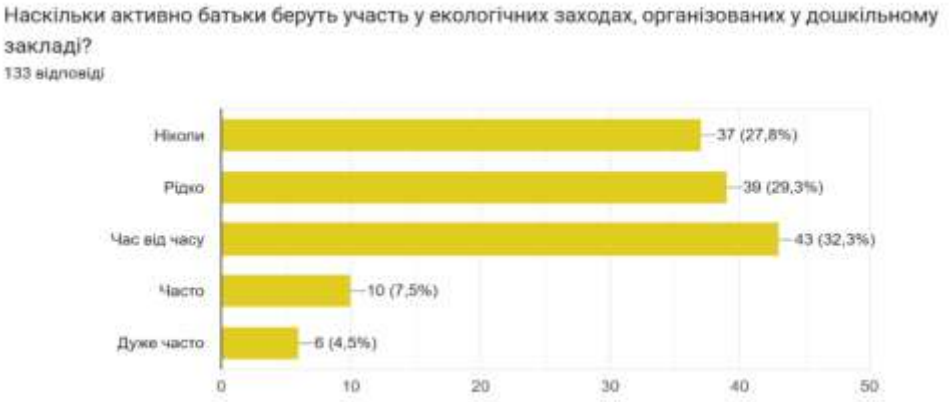


Рис. 11 – Популярність екологічних заходів серед батьків вихованців
Fig. 11 – Popularity of environmental activities among parents of pupils

спрямування для дітей, а й моделі партнерської взаємодії з родинами. Міжнародний досвід підтверджує, що співпраця педагогів і батьків є одним із визначальних чинників результативності екологічного виховання [19, 20, 21].

Загалом отримані дані узгоджуються з висновками Н. М. Горопахи, Г. В. Бєлєнької та інших, про розрив між наявністю теоретичних знань у дорослих і їхнім практичним застосуванням у вихованні дітей [1, 2]. Особливість цього дослідження полягає в тому, що воно подає одночасний зріз ситуації із 7 міст України, тому змога окреслити спільні тенденції родинного екологічного виховання в різних регіонах країни [22].

Зважаючи на результати проведених соціологічних досліджень, огляду літературних джерел та вікових особливостей дошкільнят, автори пропонують цикл методичних розробок щодо екологічної освіти дітей дошкільного віку 3-7 років. Кожна розробка має чітку вікову адресність, передбачає активну участь дитини та може бути реалізована як у закладі дошкільної освіти,так і в родині.

Методичні розробки для екологічної освіти дошкільнят. Для дітей від 3 років запропоновано *екологічний дослід* «Джерело життя». Його зміст полягає у висаджуванні насіння у чотири контейнери з різними умовами: ґрунт із поливом, ґрунт без поливу, ватний диск із поливом і ватний диск без поливу. Протягом кількох тижнів дошкільнята спостерігають за проростанням насіння і порівнюють результати. Такий дослід дає змогу через власне спостереження зрозуміти значення води для життя рослин. Після завершення роботи педагог обговорює з дітьми прості правила ощадного поводження з водою: закривати кран, не витрачати воду без потреби, не забруднювати водойми під час відпочинку.

Для вихованців від 4 років розроблено *екологічний дослід* «Родючий город». Діти разом із педагогом добирають ґрунт, пісок, глину та щебінь, висаджують насіння у кожен із матеріалів і протягом кількох тижнів фіксують відмінності у рості рослин. Висновок про ґрунт як найсприятливіше середовище для проростання формується не шляхом готового пояснення, а через порівняння результатів. Далі вихователь розкриває значення ґрунтових організмів, мікроорганізмів, черв'яків і комах для родючості та пояснює, чому ґрунт потребує охорони від забруднення.

Екологічний карнавал «Чисте повітря» орієнтований на дітей 4-7 років і передбачає участь батьків. Учасники готують костюми Вітерця, Хмаринки, Деревців, Машинок, Робітників заводу, Пташенят та Інспектора-еколога. У сценарії через казкову форму показано наслідки забруднення повітря: Пташенята і діти починають кашляти, а Машинки та Робітники усвідомлюють власну відповідальність. Завершення у формі примирення і спільного хороводу допомагає не залякати дитину, а підвести її до думки про можливість виправлення ситуації. Конкурси на кращий костюм, екологічне гасло та малюнок посилюють емоційне залучення родин.

Інтерактивна гра «Володькині фантики» для дітей від 4 років розкриває проблему сміття через рольову постановку. Дошкільнята виконують ролі Річок, Вітерців, Рибок, Квіток та Оленят. За сюжетом хлопчик Володька викидає фантики у Річку, після чого діти простежують, як відходи

переміщуються у природному середовищі й завдають шкоди його мешканцям: Рибка заплутується у пакеті, Квіти вкриваються сміттям, Оленята не можуть знайти їжу. Коли герой усвідомлює наслідки, він збирає сміття і відносить його до контейнера. Після гри педагог обговорює з дітьми правила поводження з відходами та значення роздільного їх збору.

Екологічний проєкт «Сортуй сміття правильно» призначений для вихованців від 4 років і базується на сертифікованій настільній грі «Еко-Батл». Діти розкладають картки із зображеннями різних відходів у чотири кольорові контейнери: для пластику, паперу, органічних та шкідливих відходів. Після обговорення помилок вихованці створюють власні малюнки-стікери з позначенням категорій сміття і передають їх батькам як домашнє завдання. Таким чином, методична розробка поєднує роботу в закладі дошкільної освіти з продовженням екологічної практики вдома.

Настільна гра «Екологічне лото» для дітей від 5 років спрямована на формування первинного розуміння природних ресурсів. Команди з чотирьох вихованців заповнюють ігрові поля картками, що показують зв'язок між природними матеріалами та предметами щоденного вжитку, їжею й одягом. Педагог підводить дітей до висновку, що більшість речей, якими користується людина, має природне походження, тому ресурси потрібно використовувати ощадливо. Переможцем стає команда, яка першою правильно заповнює ігрове поле.

Екологічна акція «Чисте довкілля – здорові діти» розрахована на дітей 6-7 років і проводиться разом із батьками. На початку педагог організовує експрес-конкурс малюнка «Природа і суспільство» та пояснює зміст поняття «екологічна акція». Далі учасники прибирають визначену територію, сортуючи зібрані відходи за категоріями. Завершальним етапом є висаджування дерев і кущів відповідно до попередньо підготовленого ландшафтного плану. Діти за допомогою дорослих засипають корені саджанців ґрунтом і поливають водою рослини. Такий формат переводить екологічне виховання з рівня розмови у площину реальної родинної спільної дії.

Найскладнішою розробкою циклу є *лабораторний дослід* «Чи здоровий ваш часник?» для дітей від 6-7 років. Дошкільнята вирощують часник за двох умов поливу- чистою відстояною водою та водою з підвищеним вмістом мінеральних добрив. Після зростання зразки зеленої маси передаються для лабораторного аналізу в університет або у дослідну лабораторію. Важливо, що діти не виконують складні аналітичні операції самостійно, а беруть участь у підготовчому етапі та спостереженнях, відвідують лабораторію, знайомляться з приладом, на якому будуть визначати показники концентрації забруднювачів (важких металів)- атомно- абсорбційним спектрометром МГА 915 МД та отримують результати у зрозумілому форматі, що демонструють і пояснюють дітям [23, 24]. Для дітей старшої дошкільної групи – зокрема вихованців сьомого року життя, які вже орієнтуються у цифрах і здатні порівнювати значення за принципом «більше – менше» – результати досліду можна подавати у форматі простої візуальної таблиці. Вони здатні самостійно порівняти цифри і визначити, яка цифра більше, а яка менше, тобто у якому зразку концентрація вища. Такий формат роботи не лише надає дослідженню практичного виміру, а й повністю відповідає вимогам дошкільної освіти щодо формування початкових математичних уявлень та розвитку аналітичного мислення.

Отримані результати підтверджують надходження важких металів із поливної води до рослинної продукції [25, 26]. Для довідки: за підвищеної мінералізації води вміст Zn у зеленій масі часнику зріс майже втричі, Cu– у 24 рази, Pb – у 7 разів, Mn – у 37 разів порівняно з контрольними зразками. У воді з добривами також зафіксовано перевищення допустимих норм за Pb перевищено у 6 разів, Mn – у 20 разів. Хоча показники у рослинній масі формально не перевищили норми концентрації для овочів, сама динаміка накопичення за короткий період поливу демонструє потенційний екологічний ризик у разі тривалого споживання такої продукції.

Для дітей цей результат подається через простий висновок – якщо вода забруднена, рослина також може накопичувати небезпечні речовини. Для наочності такого процесу педагог демонструє модельний дослід із білою квіткою, яку поставили у розчин блакитного харчового барвника. Наступного дня відбулася зміна кольору пелюсток квітки, що наочно показало дітям процес поглинання забруднюючих речовин рослиною.

Висновки

Дошкільний вік є сприятливим періодом для закладання основ екологічного світогляду. У цей час дитина активно пізнає навколишній світ, емоційно реагує на живу природу і здатна засвоювати прості правила екологічно відповідальної поведінки через гру, спостереження та практичні дії.

Порівняння досвіду Швеції, Японії, Англії, США та Німеччини засвідчило, що ефективна дошкільна екологічна освіта спирається на безпосередню взаємодію дитини з природним середовищем. Методика «лісових шкіл» та близькі до неї практики підтверджують педагогічну результативність навчання через дію. Для України актуальним залишається перехід від переважно вербального ознайомлення з природою до системної діяльнісної моделі. Прикладом для такого переходу можуть слугувати спеціалізовані заклади дошкільної освіти, що працюють за авторськими програмами або розробленими професійними методистами у галузі дошкільної освіти. Такі садки з поглибленим природничо спрямованим вихованням демонструють, що системна екологічна освіта дошкільнят є практично реалізованою моделлю, а не лише теоретичним орієнтиром.

Опитування батьків із різних міст України показало розрив між визнанням важливості екологічного виховання і реальними родинними практиками. 95,6 % респондентів вважають його необхідним у дошкільному віці, однак лише 68 % обговорюють такі теми з дітьми. Регулярна участь родин в екологічних акціях становить 22,8 %, що підтверджує потребу в методичній підтримці батьків.

Практичні заняття з дітьми стосовно виконання лабораторних дослідів показує наочно вплив різноманітних факторів на якість компонентів довкілля. Такі підходи також є переконливим наочним навчанням для пояснення дошкільнятам зв'язку між забрудненням довкілля і екологічною безпекою харчових продуктів.

Запропонований цикл методичних матеріалів для дітей 3-7 років спрямований на подолання дефіциту практичного забезпечення дошкільної екологічної освіти. Розробки побудовані на активній участі вихованців, поєднують гру, спостереження, дослід і природоохоронну дію та можуть використовуватися як у закладах дошкільної освіти, так і в сімейному вихованні. Наскрізною умовою результативності є партнерство педагогів і батьків, оскільки саме узгоджені дії освітнього закладу й родини формують сталий екологічний світогляд дитини.

Конфлікт інтересів

Автори засвідчують, що, незважаючи на те, що один із авторів статті є членом редакційної колегії цього журналу, процес рецензування, прийняття рішення щодо публікації та редагування проводилися незалежно, без його участі чи впливу. Будь-які потенційні конфлікти інтересів були повністю усунені шляхом зовнішнього контролю процесу. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Декларація про використання ШІ

В роботі використано ресурс штучного інтелекту Claude для покращення стиля та виправлення мовних помилок у тексті статті. Остаточний текст був переглянутий та перевірений авторами.

Список використаної літератури

1. Бєлєнька Г. В., Науменко Т. С., Половіна О. В. Дошкільнятам про світ природи. Київ: Київський університет імені Бориса Грінченка, 2013. 115 с. URL:https://elibrary.kubg.edu.ua/id/eprint/3867/2/G_Belenky_O_Polovin%D0%B0_T_Naumenko_PANW_PED_PI.pdf
2. Горопаха Н. М. Екологізація розвивального середовища дошкільного закладу. Педагогічні науки: збірник наукових праць. 2014. Вип. 65. С. 396–402. URL: https://vseosvita.ua/library/embed/0100aan2-4b17.docx.html
3. Репета С. Р., Джура Н. М. Екологічне виховання дітей старшого дошкільного віку в умовах закладу дошкільної освіти. *Дошкільна педагогіка.* 2022. Том 1. Вип. 50. С. 199-203. https://doi.org/10.32782/2663-6085/2022/50.1.41

4. Іванчук С. А. Екологічне виховання дошкільників у контексті його актуальних дефініцій. *Педагогіка формування творчої особистості у вищій і загальноосвітній школах*. 2020. С. 54-58 № 70. Т. 2. С. 54–58. https://doi.org/10.32840/1992-5786.2020.70-2.9
5. O'Brien L., Murray R. Forest School and its impacts on young children: Case studies in Britain. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2007. Vol. 6. P. 249–265. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2007.03.006
6. Hepworth A. Attending 12 weekly Forest School sessions improves mood and cooperation in 7–8-year-old children. *Journal of Adventure Education and Outdoor Learning*. 2024. https://doi.org/10.1080/14729679.2024.2393130
7. Шабалін, А. Ю. (2025). Особливості екологічної освіти в дошкільному віці (Кваліфікаційна робота бакалавра, спеціальність 101 «Екологія»). Харків: Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна. URL: https://ekhnuir.karazin.ua/handle/123456789/22661
8. Про концепцію екологічної освіти в Україні : Рішення МОН України від 20.12.2001 № 13/6-19 (поточна редакція від 01.01.2026). Законодавство України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/v6-19290-01
9. Базовий компонент дошкільної освіти (Державний стандарт дошкільної освіти) : наказ МОН від 12.01.2021 № 33. Офіційний сайт МОН України. URL:https://mon.gov.ua/staticobjects/mon/sites/1/rizne/2021/12.01/Pro_novu_redaktsiyu%20Bazovoho%20komponenta%20doshkilnoyi%20osvity.pdf
10. Підготовка майбутніх вихователів до формування екологічної компетентності дошкільників : монографія / за ред. Ю. М. Косенко. Полтава: ПНПУ ім. В. Г. Короленка, 2021. С. 267-303. URL: https://publishing.pnpu.edu.ua/catalog/download/520/734/3535?inline=1
11. Forest School Association. (n.d.). What is Forest School?. URL: https://forestschoolassociation.org/what-is-forest-school/
12. Learning through Landscapes. (n.d.). Forest Kindergarten. URL: https://ltl.org.uk/forest-kindergarten/
13. Dabaja Z. The Forest School impact on children: reviewing two decades of research. ResearchGate. 2021. URL:https://www.researchgate.net/publication/349826342_The_Forest_School_impact_on_children_reviewing_two_decades_of_research
14. Frances Harris, Developing a relationship with nature and place: the potential role of forest school. Environmental Education Research. 2021. https://doi.org/10.1080/13504622.2021.1896679
15. Natural Start Alliance. Nature Preschools in the United States: 2022 Survey. Washington, DC : North American Association for Environmental Education (NAAEE), 2023. URL: https://naturalstart.org/nature-preschools-united-states-2022-survey
16. Pikus A. E., Skibbe L. E., Larimore R. A., Sobel D. Investigating Nature-based Preschoolers Gains in Early Literacy and Select Executive Function Skills. AERA Open. 2025. https://doi.org/10.1177/23328584251362714
17. Shimpei Iwasaki, Effects of Environmental Education on Young Children's Water-Saving Behaviors in Japan. Sustainability. 2022. Vol. 14, No. 6. P. 3382. https://doi.org/10.3390/su14063382
18. Poje, M., Marinić, I., Stanisavljević, A., Rechner Dika, I. Environmental Education on Sustainable Principles in Kindergartens — A Foundation or an Option? Sustainability. 2024. Vol. 16, No. 7. P. 2707. https://doi.org/10.3390/su16072707
19. Samsu Alam, Rahma Ashari Hamzah The role of parental involvement in promoting Education for Sustainability in primary schools. Asian Education and Development Studies. 2025. Vol. 14, No. 3. P. 563–578. https://doi.org/10.1108/AEDS-07-2024-0151
20. Markus Hadler, Beate Klösch, Stephan Schwarzinger, Markus Schweighart, Rebecca Wardana, David Neil Bird, Measuring Environmental Attitudes and Behaviors. In: Surveying Climate-Relevant Behavior. Palgrave Macmillan, Cham, 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85796-7_2
21. Serena Lidia Colombo, Salvatore Gaetano Chiarella, Antonino Raffone, Luca Simione Understanding the Environmental Attitude-Behaviour Gap: The Moderating Role of Dispositional Mindfulness. Sustainability. 2023. Vol. 15, No. 9. P. 7285. https://doi.org/10.3390/su15097285
22. Куліш М. Ф. Екологічне виховання дітей дошкільного віку як складова їх всебічного розвитку : кваліфікаційна робота. Чернігів : ЧНПУ ім. Т. Г. Шевченка, 2022. 66 с. URL:https://epub.chnpu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/9960/1/%D0%9A%D1%83%D0%BB%D1%96%D1%88%20%D0%9C.%D0%A4.%20%D0%95%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D1%96%D1%87%D0%BD%D0%B5%20%D0%B2%D0%B8%D1%85%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F.pdf
23. Некос А. Н., Безсонний В. Л., Уварова С. Д. Діяльнісний підхід в екологічній просвіті через дослідження ґрунтового покриву. Здоров'я ґрунтів як складова Стратегії єдиного здоров'я суспільства : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Харків, 3 груд. 2025). Харків: ННЦ «ІҐА імені О. Н. Соколовського»., 2025. С. 87–90. URL: http://www.issar.com.ua/uk/vydannya
24. Некос А. Н., Кочанов Е. О., Уварова С. Д. Інтеграція екологічної освіти та виховання в освітній процес. Євроінтеграція екологічної політики України : матеріали VII Всеукр. наук.-практ. конф., (м. Одеса, 3–5

листоп. 2025 р.) Одеса: Одеський національний ун-т імені І. І. Мечникова. 2025. С. 248-250. URL: https://drive.google.com/drive/folders/14_WFq7rJ3WPBEeWMYtj_NsKtsPd3IEtn?usp=drive_link
25. Saquib Ali, Rajesh Ahirwar Accumulation of toxic metals in vegetable crops and associated dietary exposure risks to human health. Discover Environment. 2025. https://doi.org/10.1007/s44274-025-00373-w
26. Nehar Ullah, Maqsood Ur Rehman, Bashir Ahmad, Irshad Ali, Muhammad Younas, Muhammad Sagheer Aslam, Atta-ur Rahman, Ensiyeh Taheri, Ali Fatehizadeh, Mashallah Rezakazemi Assessment of heavy metals accumulation in agricultural soil, vegetables and associated health risks. NCBI / PMC. 2022. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0267719

Стаття надійшла до редакції 15.04.2026 Переглянуто 16.05.2026
Стаття рекомендована до друку 20.05.2026 Опубліковано 30.05.2026

A. **N. NEKOS**[1], DSc (Geography), Prof.,
Professor of the Department of Environmental Monitoring and Protected Areas Management
e-mail: nekos@karazin.ua ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-1852-0234
V. N. Karazin Kharkiv National University,
4, Svobody Sq,, Kharkiv, 61022, Ukraine

S. D. UVAROVA[1],
Bachelor
e-mail: sofiia.uvarova@student.karazin.ua ORCID ID: https://orcid.org/0009-0007-0384-1074
V. N. Karazin Kharkiv National University,
4, Svobody Sq,, Kharkiv, 61022, Ukraine

A. Y. SHABALIN[1],
Master's Degree
e-mail: anna.shabalin@student.karazin.ua ORCID ID: https://orcid.org/0009-0008-1772-5549

[1]V. N. Karazin Kharkiv National University,
4, Svobody Sq,, Kharkiv, 61022, Ukraine

FEATURES OF ENVIRONMENTAL EDUCATION FOR PRESCHOOL CHILDREN

Purpose. To determine the current state of environmental education for preschool children in Ukraine and to propose a comprehensive set of methodological developments for preschool education institutions and family upbringing.

Methods. Systematic and comparative analysis of the content and quality of preschool environmental education, sociological research methods, the atomic absorption spectrometry method as an example of visual and practical learning**.**

Results. A comparison of approaches to preschool environmental education in Germany, the USA, England, Japan and Sweden determined that effective preschool environmental education is based primarily on the child's direct experience in the natural environment, and not on the isolated assimilation of theoretical information. The Swedish model of "forest schools" is considered in studies as an effective way to develop independence, social interaction and a responsible attitude towards the environment. An online survey of parents of preschoolers from Zaporizhia, Uzhgorod, Vinnytsia, Poltava, Lviv, Kyiv and Kharkiv revealed a significant gap between the attitudes and actions of parents: the majority recognize the importance of environmental education of preschoolers; slightly more than half turn to environmental topics; A very small number of parents systematically participate in environmental activities; in the home practice of environmental education, conversations prevail, while the implementation of practical experiments and joint environmental projects by parents is used much less. Spectrometric analysis of the content of heavy metals in plant products, performed during the demonstration of practical work, demonstrated a successful approach to visualizing research activities for children. The proposed methodological cycle contains 8 developments for children 3-7 years old.

Conclusions. The period of preschool childhood is key for the formation of primary ecological ideas, emotional and value-based attitudes towards nature and skills of environmentally appropriate behavior. Practical activities in nature should be considered as a basic component of the educational process, and not as an episodic addition. The lack of adapted methodological materials and weak participation of families mutually reinforce each

other, therefore they require a comprehensive pedagogical solution. The proposed methodological cycle takes into account the age characteristics of preschoolers and can be applied both in preschool education institutions and in family education.

KEYWORDS: *preschool environmental education, environmental upbringing, methodological materials, sociological survey, environmental worldview, sustainable development*

Conflict of Interest

The authors certify that, although one of the authors of the article is a member of the editorial board of this journal, the peer review, publication decision, and editorial processes were conducted independently, without their participation or influence. Any potential conflicts of interest were fully mitigated through external oversight of the process. Further-more, the authors have fully adhered to ethical norms, including avoiding plagiarism, data falsification, and duplicate publication.

Authors Contribution: all authors have contributed equally to this work.

AI Statement

The work used the Claude artificial intelligence resource to improve the style and correct language errors in the text of the article. The final text was reviewed and verified by the authors.

References

1. Belenka, G. V., Naumenko, T. S., & Polovina, O. V. (2013). Preschoolers about the world of nature: teaching and methodological manual. Kyiv: Borys Grinchenko Kyiv University. Retrieved from https://elibrary.kubg.edu.ua/id/eprint/3867/2/G_Belenky_O_Polovin%D0%B0_T_Naumenko_PANW_PED_PI.pdf
2. Goropakha, N. M. (2014). Ecologization of the developmental environment of a preschool institution. *Pedagogical Sciences: collection of scientific works*, (65), 396–402. Retrieved from https://vseosvita.ua/library/embed/0100aan2-4b17.docx.html
5. 3. Repeta, S. R., & Dzhura, N. M. (2022). Environmental education of older preschool children in the conditions of a preschool education institution. *Preschool Pedagogy. Innovative Pedagogy*, 1(50), 199–203. https://doi.org/10.32782/2663- 6085/2022/50.1.41
4. Ivanchuk, S. A. (2020). Environmental education of preschoolers in the context of its current definitions. *Pedagogy of forming a creative personality in higher and general secondary schools*, 2(70), 54–58. https://doi.org/10.32840/1992-5786.2020.70-2.9
5. O'Brien, L., & Murray, R. (2007). Forest School and its impacts on young children: Case studies in Britain. *Urban Forestry & Urban Greening*, 6, 249–265. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2007.03.006
6. Hepworth, A. (2024). Attending 12 weekly Forest School sessions improves mood and cooperation in 7–8-year-old children. *Journal of Adventure Education and Outdoor Learning.* https://doi.org/10.1080/14729679.2024.2393130
7. Shabalin, A. Yu. (2025). *Features of environmental education in preschool age* (Bachelor's qualification thesis, specialty 101 «Ecology»). V. N. Karazin Kharkiv National University. Retrieved from https://ekhnuir.karazin.ua/handle/123456789/22661
8. On the Concept of Environmental Education in Ukraine: Decision of the Ministry of Education and Science of Ukraine dated 20.12.2001 No. 13/6-19 (current version as of 01.01.2026). (2001). *Legislation of Ukraine.* Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/go/v6-19290-01
9. Basic Component of Preschool Education (State Standard of Preschool Education): Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine dated 12.01.2021 No. 33. (2021). *Official website of the Ministry of Education and Science of Ukraine.* Retrieved from https://mon.gov.ua/staticobjects/mon/sites/1/rizne/2021/12.01/Pro_novu_redaktsiyu%20Bazovoho%20komponenta%20doshkilnoyi%20osvity.pdf
10. Kosenko, Yu. M. (Ed.). (2021). *Training of future educators for the formation of preschool children's environmental competence: monograph* (pp. 267–303). V. G. Korolenko Poltava National Pedagogical University. Retrieved from https://publishing.pnpu.edu.ua/catalog/download/520/734/3535?inline=1
11. Forest School Association. (n.d.). *What is Forest School?* Retrieved from https://forestschoolassociation.org/what-is-forest-school/
12. Learning through Landscapes. (n.d.). *Forest Kindergarten.* Retrieved from https://ltl.org.uk/forest-kindergarten/
13. Dabaja, Z. (2021). The Forest School impact on children: reviewing two decades of research. *ResearchGate.* Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/349826342_The_Forest_School_impact_on_children_reviewing_two_decades_of_research

14. Harris, F. (2021). Developing a relationship with nature and place: the potential role of forest school. *Environmental Education Research.* https://doi.org/10.1080/13504622.2021.1896679
15. Natural Start Alliance. (2023). *Nature Preschools in the United States: 2022 Survey.* North American Association for Environmental Education (NAAEE). Retrieved from https://naturalstart.org/nature-preschools-united-states-2022-survey
16. Pikus, A. E., Skibbe, L. E., Larimore, R. A., & Sobel, D. (2025). Investigating Nature-based Preschoolers Gains in Early Literacy and Select Executive Function Skills. *AERA Open.* https://doi.org/10.1177/23328584251362714
17. Iwasaki, S. (2022). Effects of Environmental Education on Young Children's Water-Saving Behaviors in Japan. *Sustainability*, 14(6), 3382. https://doi.org/10.3390/su14063382
18. Poje, M., Marinić, I., Stanisavljević, A., & Rechner Dika, I. (2024). Environmental Education on Sustainable Principles in Kindergartens — A Foundation or an Option? *Sustainability*, 16(7), 2707. https://doi.org/10.3390/su16072707
19. Alam, S., & Hamzah, R. A. (2025). The role of parental involvement in promoting Education for Sustainability in primary schools. *Asian Education and Development Studies*, 14(3), 563–578. https://doi.org/10.1108/AEDS-07-2024-0151
20. Hadler, M., Klösch, B., Schwarzinger, S., Schweighart, M., Wardana, R., & Bird, D. N. (2022). Measuring Environmental Attitudes and Behaviors. In *Surveying Climate-Relevant Behavior*. Palgrave Macmillan. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85796-7_2
21. Colombo, S. L., Chiarella, S. G., Raffone, A., & Simione, L. (2023). Understanding the Environmental Attitude-Behaviour Gap: The Moderating Role of Dispositional Mindfulness. *Sustainability*, 15(9), 7285. https://doi.org/10.3390/su15097285
22. Kulish, M. F. (2022). *Environmental education of preschool children as a component of their comprehensive development* (Qualification thesis). T. H. Shevchenko Chernihiv National Pedagogical University. Retrieved from https://epub.chnpu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/9960/1/%D0%9A%D1%83%D0%BB%D1%96%D1%88%20%D0%9C.%D0%A4.%20%D0%95%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D1%96%D1%87%D0%BD%D0%B5%20%D0%B2%D0%B8%D1%85%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F.pdf
23. Nekos, A. N., Bezsonnyi, V. L., & Uvarova, S. D. (2025). Activity-based approach in environmental education through the study of soil cover. In *Soil Health as a Component of the One Health Strategy for Society: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference (Kharkiv, December 3, 2025)* (pp. 87–90). NSC «ISSAR named after O. N. Sokolovskyi». Retrieved from http://www.issar.com.ua/uk/vydannya
24. Nekos, A. N., Kochanov, E. O., & Uvarova, S. D. (2025). Integration of environmental education and upbringing into the educational process. In *Eurointegration of Ukraine's Environmental Policy: Materials of the VII All-Ukrainian Scientific and Practical Conference (Odesa, November 3–5, 2025)* (pp. 248–250). Odesa National University I. I. Mechnikov. Retrieved from https://drive.google.com/drive/folders/14_WFq7rJ3WPBEeWMYtj_NsKtsPd3IEtn?usp=drive_link
25. Ali, S., & Ahirwar, R. (2025). Accumulation of toxic metals in vegetable crops and associated dietary exposure risks to human health. *Discover Environment.* https://doi.org/10.1007/s44274-025-00373-w
26. Ullah, N., Ur Rehman, M., Ahmad, B., Ali, I., Younas, M., Aslam, M. S., … Rezakazemi, M. (2022). Assessment of heavy metals accumulation in agricultural soil, vegetables and associated health risks. *NCBI / PMC.* https://doi.org/10.1371/journal.pone.0267719

The article was received by the editors 15.04.2026 The article was revised 16.05.2026
The article is recommended for printing 20.05.2026 This article published 30.05.2026

Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія: «Екологія» є збірником наукових робіт, який включено до Переліку ВАК фахових видань, в яких можна публікувати основні результати дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора і кандидата географічних наук (спеціальності 101,103) та біологічних наук (спеціальності 091,101).

До публікації приймаються статті, які написані українською або англійською мовами згідно з правилами для авторів і отримали позитивні рекомендації рецензентів.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРІВ

Електронна версія оформляється у форматі Microsoft Word, шрифт Times New Roman, розмір 11, міжрядковий інтервал 1,0, всі поля по 2,5 см. Жирним шрифтом виділяються підзаголовки у статті; курсив допускається лише у виняткових випадках.

Ілюстрації, включаючи графіки і схеми, мають бути розміщені безпосередньо в тексті. Ілюстрації подаються чорно-білими. Скрізь, де можливо, доцільніше використовувати графіки, а не таблиці.

Орієнтація сторінок – книжкова. Вирівнювання – по ширині.

Відступ для абзацу – 1,00 см.

Для статей необхідно вказати УДК (UDC): (зліва, розмір 11), ініціали та прізвище автора, науковий ступінь, звання та посаду (розмір 11, по центру), e-mail та https://orcid.org/ усіх співавторів, повну назву установи та її адреса (розмір 11, по центру).

Анотація має бути структурованою для експериментальних робіт, тобто обов'язково вказати: **Мета. Методи. Результати. Висновки.**

Текст статті має відповідати вимогам ВАК. Посилання на джерела у статті давати в прямокутних дужках [ ] із зазначенням номера в порядку посилання у тексті.

Список використаної літератури обов'язково оформляється за ДСТУ 8302:2015, обов'язково містити (50%) джерела, що опубліковані не більше 5 років тому: розмір 10, міжрядковий інтервал 1,0. Кількість посилань має бути не менше 15. Обов'язково вказувати DOI або URL-електронну адресу посилань.

Через 2 інтервали також **подати прізвище, науковий ступінь, наукове звання та посаду, e-mail та https://orcid.org/ , організацію, її повну адресу, назву статті, розширену анотацію та ключові слова** ***англійською мовою***: розмір 10, міжрядковий інтервал 1,0. Анотація повинна бути побудована як реферат у реферативних журналах та відражати суть експериментів, основні результати та їх інтерпретацію. Для експериментальних статей подати структуровані резюме де має бути вказані слова: **Purpose. Methods. Result. Conclusion**.; та **KEYWORDS** (ключові слова) – 5-6 слів

Подати також **References**, за стандартом APA (прізвище, ініціали, назва - англійською, та **Retrieved from або DOI**, наприкінці у дужках (In Ukrainian)

Адреса редакції: навчально-науковий інститут екології, 4 поверх, к. 483а,
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
пл. Свободи, 6, Харків, Україна, 61022
тел. +38-057- 707-53-86 e-mail: visnykecology@karazin.ua ecology.journal@karazin.ua
Web-page: http://periodicals.karazin.ua/ecology (OJS)

Наукове видання

ВІСНИК ХАРКІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ імені В. Н. КАРАЗІНА

СЕРІЯ «ЕКОЛОГІЯ»
Вип. 34

Збірник наукових праць

Українською та англійською мовами

Макетування та комп'ютерне верстання
Баскакова Л. В.

Підписано до друку 30.05.2026 Формат 60 х 84 1/8 . Папір офсетний.
Друк ризографічний

Ум. друк. арк. 16,01. Обл.-вид. арк. 22,01
Наклад 50 пр. Зам. № 7/26

61022 Харків, майдан Свободи, 6
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Надруковано ХНУ імені В. Н. Каразіна
61022, Харків, майдан Свободи, 4.
Тел. 705-24-32
Видавництво

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3367 від 13.01.09