

ISSN 1992-4224 (Print)
ISSN 2415-7678 (Online)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені В. Н. КАРАЗІНА

**ЛЮДИНА
ТА
ДОВКІЛЛЯ**

ПРОБЛЕМИ НЕОЕКОЛОГІЇ

**MAN AND ENVIRONMENT
ISSUES OF NEOECOLOGY**

**Випуск 45
ISSUES 45**

Харків
Kharkiv
2026

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

Наукове фахове видання України Категорії «Б» в галузях наук:
Е Природничі науки за спеціальностями: Е2 Екологія, Е4 Науки про Землю;
Н Аграрні науки та продовольство за спеціальностями: Н1 Агрономія, Н5 Лісове господарство.
Наказ МОН України № 409 від 17.03.2020

Засновано у 1999 році
Періодичність виходу – 2 рази на рік

УДК 502/504(574)+911+630/631

Журнал публікує оригінальні наукові статті, що висвітлюють сучасні екологічні та геоекологічні дослідження, результати міждисциплінарних наукових робіт, а також нові підходи до аналізу, оцінки та управління станом природного середовища.

Висвітлюються результати сучасних фундаментальних і прикладних досліджень у галузях екології та наук про Землю, спрямованих на вивчення взаємодії суспільства і природного середовища, оцінку антропогенного впливу на природні системи та розроблення науково обґрунтованих підходів до охорони довкілля і сталого природокористування у межах неоекологічної парадигми.

Для науковців і фахівців в галузі екології, географії та сільського господарства, а також викладачів, аспірантів, магістрів і студентів вищих навчальних закладів.

Затверджено до друку рішенням Вченої ради Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (протокол 9 від 25.05.2026 р.)

Головний редактор:

Максименко Н. В., д-р геогр. наук, проф., Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Україна;
Заступник головного редактора:

Шкаруба А., д-р філософії, Естонський університет наук про життя, Тарту, Естонія;

Редакційна колегія:

Безсонний В. Л., д-р техн. наук, доц., Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, Україна;

Бігунова М., (PhD), Словацький університет сільського господарства в Нітрі, Словаччина

Горошкова Л. А., д-р екон. наук, проф., Національний університет «Києво-Могилянська академія», Україна

Занінович Т., д-р філософії з техн. наук, доц., Загребський університет, Хорватія

Крайнюков О. М., д-р геогр. наук, проф., Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Україна;

Кривцов В., д-р філософії, Единбургський університет, Великобританія;

Некос А. Н., д-р геогр. наук, проф., Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Україна;;

Пересадько В. А., д-р географ. наук, проф., Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Україна

Сафранов Т. А., д-р геол.-мін. наук, проф., Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, Україна;;

Сонько С. П., д-р геогр. наук, проф., Уманський національний університет, Україна.

Адреса редакційної колегії: 61022, Харків, майдан Свободи, 6,
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, ННІ екології, зеленої енергетики та сталого розвитку, кімн. 473а

Тел. 057-707-53-86, e-mail: ecology_journal@karazin.ua

<http://periodicals.karazin.ua/humanenviron/about>

<https://ecology.karazin.ua/>

Автори опублікованих матеріалів несуть повну відповідальність за достовірність наведених фактів, власних імен тощо.

Статті пройшли подвійне анонімне рецензування

Ідентифікатор медіа у Реєстрі суб'єктів у сфері медіа: R30-04454

(Рішення № 1538 від 09.05.2024 р. Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення.

Протокол № 15)

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

The Journal is a professional publication in the field of science:
E Natural sciences by specialties: E2 Ecology, E4 Earth sciences;
H Agricultural sciences and food by specialties: H1 Agronomy, H5 Forestry.
MES Ukraine Order № 409 of 17/03/2020

Established in 1999
Published 2 times a year

UDC 502/504(574) +911+630/631

The journal publishes original research articles presenting the results of interdisciplinary environmental studies, innovative methodological approaches, and new insights into the analysis, assessment, and management of environmental systems.

The scientific journal is a professional scientific publication, aimed at disseminating the results of contemporary fundamental and applied research in the fields of Ecology and Earth Sciences. The journal focuses on the study of interactions between society and the natural environment, the assessment of anthropogenic impacts on natural systems, and the development of scientifically grounded approaches to environmental protection and sustainable natural resource management within the neo-ecological paradigm.

For scientists and specialists in the field of environmental sciences, geography and agriculture, as well as teachers, graduate students, masters and students of higher educational establishments.

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

Editor-in-chief: **Maksymenko N. V.**, DSc (Geography), Prof., V.N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine;
Deputy Editor: **Shkaruba A.**, PhD, Estonian University of Life Sciences, Estonia.

The Editorial Board

Bezsonnyi, V. L. DSc (Technical), Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Ukraine;
Bihuňová, M., PhD, Assist. Professor, Slovak University of Agriculture in NitraNitra, Slovakia
Horoshkova L. A., DSc (Economy), Professor, National university of Kyiv Mohyla academy, Ukraine
Zaninović T., PhD (Technical), Assistant Professor, University of Zagreb,Zagreb, Croatia
Krainiukov O. M., DSc (Geography), Prof., V.N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine;
Krivtsov V., PhD, University of Edinburgh, United Kingdom;
Nekos A. N., DSc (Geography), Prof., V.N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine;
Peresadko V. A., DSc (Geography), Professor, V. N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine
Safranov T. A., DSc (Geology and Mineralogy), Prof., Odesa I.I. Mechnikov National University, Ukraine;
Sonko S. P., DSc (Geography), Prof., Uman National University, Ukraine

Editorial Board Address: 6 Svobody Sq., 61022, Kharkiv, V.N. Karazin Kharkiv National University,
Education and Research Institute of Ecology, Green Energy, and Sustainable Development, office 473a
tel. (057) 707-53-86, 705-09-66, 707-56-36, e-mail: ecology.journal@karazin.ua
Web-pages: <https://periodicals.karazin.ua/humanenviron/> (OJS)
<https://ecology.karazin.ua/>

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: R30-04454
(Decision № 1538 dated May 9, 2024 of the National Council of Television and Radio Broadcasting of Ukraine,
Protocol № 15)

ЗМІСТ

ГЕОГРАФІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

- Ачасов А. Б., Селіверстов О. Ю., Тітенко Г. В., Калашніков Р. Р.**
Досвід картографування еродованих ґрунтів на основі даних
дистанційного зондування..... 8
- Некос А. Н., Мірошниченко В. В.**
Трансформація культурних ландшафтів урбогеосистеми Харкова в умовах воєнного
впливу: конструктивно-географічний підхід до оцінювання та відновлення..... 21
- Середенко В. В.**
Аналіз стану водних ресурсів Харківської області..... 31

ЕКОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

- Сонько С. П., Неженцев А. С.**
Динаміка формування екосистемних відносин у придорожніх ландшафтах лівобережної
частини Черкаської області..... 43
- Карайм О. А., Бедункова О. О., Цьось О. О., Лавринюк З. В.**
Оцінювання екологічного стану рибогосподарських водних об'єктів
у аспекті забезпечення екосистемних послуг 55
- Сисоєва С. І.**
Оцінка еколого-туристичного потенціалу Харківської області
в умовах безпеково-екологічних ризиків воєнного часу,..... 67
- Максименко В. О., Безсонний В. Л.**
Дистанційне оцінювання просторово-часової трансформації Каховського водосховища
після руйнування греблі за даними Sentinel-2..... 79
- Максименко Н. В., Гололобов В. В., Коваль І. М., Гололобова О. О.**
Ландшафтно-екологічні основи ревіталізації ставка в дендрологічному парку
імені Б. Ф. Остапенка Державного біотехнологічного університету..... 92
- Ричак Т. Л.**
Оцінка забруднення донних відкладень важкими металами
при тривалому впливі ТЕС..... 109
- Алексєєва Т. М.**
Шум генераторів як чинник впливу на довкілля та стан здоров'я людини
(на прикладі м. Кременчук)..... 124
- Черевична Н. І., Крамаренко Д. П., Гіренко Н. І.**
Екологічні аспекти виробництва продуктів дитячого харчування..... 137
- Ковальська Л. В., Пархоменко О. Г., Луців М. М.**
Мурали як елемент урбаністичного мистецтва та чинник розвитку міського туризму
(на прикладі м. Івано-Франківськ)..... 149

ЗАПОВІДНА СПРАВА

- Горошкова Л. А., Меньшов О. І., Маслово Д. В.**
Оцінка військових впливів на природоохоронні території України
за допомогою Sentinel-1 та машинного навчання..... 163

СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ ДОСЛІДЖЕННЯ

- Борисова В. Л., Криштон Є. А., Назаренко В. В.**
Деградація лісових екосистем Лівобережного Лісостепу України та вплив
на агроландшафти: DPSIR-підхід..... 188
- Кот А. Г., Немошкालов О. М.**
Застосування сервісу Google Earth Engine для дослідження стану агроландшафтів..... 199

Ніконова В. М.	
Створення селекційно-цінного матеріалу на базі генетичного контролю жирнокислотного складу лляної олії.....	213
Корніта Г. М., Шувар І. А.	
Контроль <i>Solidago canadensis L.</i> із застосуванням різних схем гербіцидного захисту.....	221
Ковальчук О. І., Ковальчук Ю. О., Стюрко М. О.	
Кліматичні чинники розширення <i>Drosophila suzukii</i> (Матсумура) та прогноз фітосанітарного ризику для ягідництва Львівської області.....	229
ХРОНІКА	
Клещ А. А., Шевченко О. Г., Яценко Ю. В., Бурченко С. В., Гречко А. А., Костирко І. О.	
Хакатон Fresh AIR 2026 як інструмент формування інноваційних компетентностей: досвід української команди проекту Erasmus+ DOMANI.....	237
Правила оформлення статей.....	252

CONTENTS

GEOGRAPHICAL RESEARCH

Achasov A. B., Seliverstov O. Y., Titenko G. V., Kalashnikov R. R. Experience in mapping erode soils based on remote sensing data.....	8
Nekos A. N., Miroshnychenko V. V. Transformation of cultural landscapes of the Kharkiv urban geosystem under war impact: constructive-geographical approach to assessment and recovery.....	21
Seredenko V. V. Analysis of the water resources state in Kharkiv region.....	31

ENVIRONMENTAL RESEARCH

Sonko S. P., Niezhentsev A. S. Dynamics of formation of ecosystem relationships in roadside landscapes of the left-bank part of Cherkasy region.....	43
Karaim O. A., Biedunkova O. O., Tsos O. O., Lavrynyuk Z. V. Ecological status assessment of fishery water bodies in relation to ecosystem service provision.....	55
Sysoieva S. I. Assessment of the ecological and tourism potential of Kharkiv region under wartime safety and environmental risks.....	67
Maksymenko V. O., Bezsonnyi V. L. Remote sensing assessment of the spatio-temporal transformation of the Kakhovka reservoir after dam destruction using Sentinel-2 data.....	79
Maksymenko N. V., Gololobov V. V., Koval I. M., Gololobova O. O. Landscape-ecological fundamentals to the revitalization of the pond in the B. F. Ostapenko dendrological park of the State Biotechnological University	92
Rychak T. L. Assessment of heavy metal contamination in bottom sediments due to long-term exposure to TPP.....	109
Alekseeva T. M. Generator noise as a factor influencing the environment and human health (on the example of Kremenchuk).....	124
Cherevychna N. I., Kramarenko D. P., Hirenko N. I. Environmental aspects of baby food production.....	137
Kovalska L. V., Parkhomenko O. H., Lutsiv M. M. Murals as an element of urban art and a factor in the development of urban tourism (a case study of Ivano-Frankivsk).....	149

PROTECTED AREAS MANAGEMENT

Horoshkova L.A., Menshov O. I., Maslov D. V. Assessment of military impacts on protected areas of Ukraine using Sentinel-1 and machine learning	163
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

AGRICULTURAL RESEARCH

Borysova V. L., Kryshchtop Y. A., Nazarenko V. V., Degradation of forest ecosystems in the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine and impact on agricultural landscapes: DPSIR approach.....	188
Kot A. G., Nemoshkalov O.M. Application of the Google Earth Engine platform for the study of agricultural landscape conditions.....	199

<i>Nikonova V. M.</i>	
Creation of breeding material based on genetic control of the fatty acid composition of flaxseed oil.....	213
<i>Korpita H. M., Shuvar I. A.</i>	
Control of <i>Solidago canadensis L.</i> using various herbicide protection schemes.....	221
<i>Kovalchuk O. I., Kovalchuk Yu. O., Stiurko M. O.</i>	
Climate drivers of <i>Drosophila suzukii (Matsumura)</i> spread and phytosanitary risk forecast for berry production in Lviv region.....	229
CHRONICLE	
<i>Klieshch, A. A., Shevchenko, O. H., Yatsenko, Yu. V., Burchenko, S. V., Hrechko, A. A., Kostyrko, I. O.</i>	
The Fresh AIR 2026 hackathon as a tool for developing innovative skills: the experience of the ukrainian team from the Erasmus+ DOMANI project.....	237
<i>Formatting Rules</i>	252

<https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-01>

UDC: 631.427:528.8:912

A. B. ACHASOV¹, DSc (Agriculture),
Professor of the Department of Ecology and Environmental Management
e-mail: achasov@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2446-3707>

O. Y. SELIVERSTOV¹,
Senior Lecturer of the Department of Ecology and Environmental Management
e-mail: oleg.seliverstov@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8477-274X>

G. V. TITENKO¹, PhD (Geography),
Associate Professor of the Department of Ecology and Environmental Management
e-mail: titenko@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8477-0672>

R. R. KALASHNIKOV¹,
Bachelor Student
e-mail: ruslan.kalashnikov@student.karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-3616-400X>

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

EXPERIENCE IN MAPPING ERODE SOILS BASED ON REMOTE SENSING DATA

Purpose. Demonstration of the capabilities of modern Earth remote sensing data and geoinformation technologies for the identification and large-scale mapping of eroded soils with a special emphasis on the detection of sheet water erosion, which remains insufficiently represented on the existing soil maps of Ukraine.

Methods. Data processing was performed on the Google Earth Engine platform by generating a bare soil composite image based on the Bare Soil Index (BSI), scene classification masks, and median pixel reduction. Identification of eroded areas was carried out by visual interpretation taking into account spectral, spatial, and morphological features of water erosion.

Results. The study was conducted within the territory of the Novoodeska territorial community of Mykolaiv region using archival maps of agro-production soil groups at a scale of 1:10,000 and multitemporal Sentinel-2 satellite images for the period 2020–2025. Significant discrepancies were identified between archival soil maps and the current spatial distribution of eroded soils, indicating an intensification of degradation processes over recent decades. The application of multitemporal bare soil composites ensured reliable delineation of severely eroded soils and outcrops of parent materials within agricultural landscapes. As a result, an updated large-scale map of severely eroded soils at a scale of 1:10,000 was created, which significantly exceeds existing cartographic materials in terms of detail and reliability.

Conclusion. It has been proven that the integration of multitemporal Sentinel-2 satellite imagery and cloud-based geoinformation analysis significantly increases the accuracy of water erosion mapping, especially its sheet forms. The proposed approach is an effective tool for updating soil-cartographic materials.

KEYWORDS: *water erosion, eroded soils, Earth remote sensing, Sentinel-2, Google Earth Engine, soil mapping*

Як цитувати: Achasov A. B., Seliverstov O. Y., Titenko G. V., Kalashnikov R. R. Experience in mapping erode soils based on remote sensing data. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2026. Вип. 45. С. 8–20. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-01>

In cites: Achasov, A. B., Seliverstov, O. Y., Titenko, G. V., & Kalashnikov, R. R. (2026). Experience in mapping erode soils based on remote sensing data. *Man and Environment. Issues of Neoeology*, (45), 8–20. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-01>

Introduction

The current state of land resources of Ukraine is characterized by critical levels of degradation, which leads to annual economic

losses in the amount of 40–50 billion hryvnias [1]. Water erosion occupies a leading position among degradation processes. According to

© Achasov A. B., Seliverstov O. Y., Titenko G. V., Kalashnikov R. R., 2026



This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

expert estimates, the area of land affected by water erosion reaches 13.4 million hectares, including 10.6 million hectares of arable land [2]. Water erosion, as the dominant degradation process, not only reduces fertility due to the washout of the upper humus layer, but also causes a number of indirect negative consequences: disturbance of the hydrological balance, pollution of water bodies, and intensification of organic matter mineralization, which leads to an increase in greenhouse gas emissions [3].

In the context of global climate change and intensification of agricultural production, monitoring and accurate mapping of eroded soils become strategic tasks for ensuring food security and sustainable land use. Such mapping should be based on the use of Earth remote sensing (ERS) data in combination with geographic information systems (GIS), which provides prompt, objective, and high-precision analysis of the state of the soil cover [4].

There are many examples of successful application of ERS and GIS for mapping eroded soils. Seutloali et al. [5] used 30-meter multispectral Landsat TM5 satellite data to map the degree of soil erosion in Transkei, demonstrating the importance of 30-meter multispectral Landsat sensors for detecting soil erosion at the regional scale.

In paper [6], the process of mapping the ϕ coefficient is described, which characterizes the type and degrees of erosion in the empirical erosion model that is widely used in the process of creating soil erosion maps using the Erosion Potential Method (EPM). The mapping was based on the use of satellite images obtained from the Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) and Landsat 8 Operational Land Imager and Thermal Infrared Sensor (OLI/TIRS) missions over a ten-year period. Mapping and identification of erosion processes were carried

out on the Google Earth Engine (GEE) platform based on the Bare Soil Index (BSI).

Czech researchers [7] tested a remote sensing method for determining eroded areas at the regional scale using a combination of time series of Sentinel-2 image data, aerial orthophotos, and ground data. A high potential of this approach for obtaining valuable data on actual soil degradation as a result of erosion was demonstrated.

Radek Malinowski et al. [8] carried out automated mapping of rill erosion based on remote sensing data. The studies showed that the use of UAVs provides high detail for automated mapping of erosion rill networks using machine learning methods, in particular the Random Forest algorithm.

Wang et al. [9] used seven Google Earth images with different spatial resolutions combined with auxiliary data to detect gullies in parts of the chernozem region in northeastern China.

Despite the significant level of research on the topic of mapping eroded soils, it remains relevant for Ukraine primarily due to the specificity of its soil cover. In particular, most existing global publications relate to the interpretation and mapping of rill water erosion. At the same time, the issue of recording sheet erosion remains practically unconsidered. In our opinion, this is due to the fact that chernozems, which prevail on the territory of Ukraine, occupy approximately 230 million hectares, which constitutes about 1.8% of the total land area of the Earth [10].

Chernozems are characterized by high reserves of organic carbon (humus), which gives them their characteristic dark gray color, and by a deep profile. Accordingly, at the medium and strong stages of soil washout, weakly humus-enriched genetic layers reach the surface, which allows them to be sufficiently clearly identified on satellite images [3].

Objects and materials. Research methodology

The research was conducted within the territory of the Novoodeska territorial community (NTC) of Mykolaiv region (Fig. 1). The Novoodeska territorial community has 54,773 ha of agricultural land with high potential for crop production (grain crops, industrial crops) and livestock production (cattle, pigs, poultry).

The community has a high-quality soil cover represented by typical chernozems,

southern chernozems, with inclusions of meadow-chernozem soils. At the same time, there is numerous evidence of significant degradation of the soil cover, primarily due to water erosion, which requires the adoption of appropriate environmental protection measures. An example is a satellite image (Google Earth Pro service) of the territory of the NTC near the village of Novopavlivka, on which some exam-



Fig. 1 – Territory of the Novoodeska territorial community of Mykolaiv region

ples of manifestations of water erosion are highlighted with black arrows (Fig. 2).

The research was conducted within the framework of the project “DIY4Change for Green Recovery and Sustainable Development of Two Communities in Mykolaiv Region”, implemented by the NGO Mykolaiv City Development Fund. One of the project objectives was to prepare local communities for the development of a Comprehensive Spatial

Development Plan. A priority task of the project was to support the Nova Odesa community in the preparation of such a plan, which required updating and refining data on land resources. Given the agricultural profile of the community and the significant level of arable land degradation, particular emphasis was placed on mapping severely eroded soils and exposures of parent material as the most critical and environmentally vulnerable areas.



Fig. 2 – Examples of water-erosion degradation of soil cover within the territory of the Nova Odesa territorial community, Mykolaiv region

In the research, archival maps of agro-production soil groups at a scale of 1:10,000 were used, which were compiled in 1994 and 2001. All of them were georeferenced to the geographic coordinate system in the QGIS geoinformation system.

The identification of eroded soils on the images was carried out by the method of visual interpretation. Visual interpretation is a classical method of analysis of aerospace images, which is based on the recognition of objects by their characteristic features without the use of

complex software. The specialist uses direct features (color, shape, structure, etc.) and indirect relationships between them, carrying out a complex logical-intuitive process inherent specifically to humans. Due to the difficulty of full automation of such analysis, this method remains a relevant and highly effective tool that successfully complements modern methods of machine object recognition.

The image presented in Fig. 2 also shows the main drawback of the Google Earth Pro service – it presents high spatial resolution images over a period of more than 20 years, but without the possibility of ordering an image for a specific time. As can be seen in the figure, part of the fields in any image will always be covered with vegetation or its residues, which significantly complicates the interpretation process.

It is possible to partially eliminate this problem by using images from the Sentinel-2 satellite [11], which are freely available for any date range and any territory. However, in order to find high-quality images with bare soil for each field, download them, and interpret them using traditional methods, enormous time and labor costs would be required.

An alternative to this is the use of the Google Earth Engine (GEE) service. GEE [12] is a specialized cloud platform for geospatial data analysis at the planetary scale. Unlike

traditional GIS packages, GEE combines a multi-petabyte archive of satellite data with Google's high-performance computing capabilities. This makes it possible to perform complex mathematical and statistical processing of large data arrays without the need to download them to local storage media [13].

For the detection of eroded areas, a key advantage of GEE is the possibility of generating multitemporal composite images of bare soil. The algorithm is based on the analysis of time series of Sentinel-2 satellite data over several years. The software script performs an iterative review of each pixel in the data archives and applies vegetation masking based on vegetation indices.

From the stack of images where a pixel is identified as bare soil, the most representative value of spectral reflectance is selected using statistical reduction functions. This makes it possible to eliminate the influence of cloudiness, shadows, and random noise, creating a single seamless image of the entire territory of the Novoodeska community, where each field is displayed in the state after plowing or before crop emergence. The process of constructing such a composite image for the territory of the NTC will be described in detail in the next section

Results

At the first stage of the research, archival maps of agro-production soil groups for the territory of the Novoodeska community were analyzed. In particular, a vector layer of severely eroded soils was created, the legend of which is given in Table 1. The total area of eroded soils on the territory of the NTC according to archival maps is 26,013.2 ha; the area of severely washed soils is 5,214.3 ha, moderately washed soils – 10,009.7 ha, weakly washed soils – 10,789.2 ha.

A preliminary visual integrated analysis of remote sensing data and archival maps showed that far from all severely eroded soils are represented (Fig. 3). For example, plot 751 (Fig. 3a) is marked as moderately washed, whereas the satellite image indicates severe erosion (red arrow, Fig. 3b).

This is quite understandable considering the date of map compilation – the 1990s. Moreover, these dates most likely indicate not the actual conducting of field soil surveys, but only the updating of the cartographic material

itself. Over the past time, soil degradation processes could have introduced their negative corrections into the structure of the soil cover. It should also be added that at the time of map compilation, the information-technological capabilities available now – free remote sensing data and advanced geoinformation technologies – were absent, which objectively did not allow the creation of highly detailed soil maps.

Water erosion is differentiated into two main types: sheet (surface) and linear (rill) erosion. Sheet erosion is characterized by a relatively uniform washout of the topsoil layer across the entire area of the plot, which leads to the appearance of large-scale eroded zones.

Remote diagnostics of this type is based on changes in spectral properties: eroded areas appear lighter due to the exposure of sub-humus horizons. At the same time, this fact alone is not sufficient, as the light color of the soil may be caused by its natural genesis, for example podzolization or formation on parent rocks of light granulometric composition. In addition to

Table 1

Explication of eroded soils in the Nova Odesa territorial community

Agro-production soil group code	Agro-production soil group name	Area, ha
65е	Ordinary Chernozems, slightly eroded, silty light-clay, on simple slopes	504,8
65л	Ordinary Chernozems, slightly eroded, light-clay, on loess of narrow erosion-prone plateaus	3509,1
66л	Ordinary Chernozems, moderately eroded, light-clay, on loess	1771,1
66е	Ordinary Chernozems, moderately eroded, low-humus, light-clay, on loess	1076,1
67е	Ordinary Chernozems, low-humus, thin, severely eroded, heavy-loamy, on loess-like loams of complex slopes	83,7
67л	Ordinary Chernozems, severely eroded, on loess of complex exposure slopes	237,5
74е	Southern Chernozems, low-humus, slightly eroded, heavy-clay, on loess-like loams of complex slopes	256,2
74л	Southern Chernozems, low-humus, slightly eroded, light-clay, on loess of narrow erosion-prone plateaus	6433,7
74д	Chernozems, low-humus, slightly eroded, medium-loamy, on loess-like loams underlain by limestone from 150 cm.	33,1
75д	Southern Chernozems, low-humus, moderately eroded, medium-loamy, on loess-like loams	573,3
75е	Southern Chernozems, low-humus, moderately eroded, heavy-loamy, on loess-like loams of complex slopes	1710,9
75л	Southern Chernozems, low-humus, moderately eroded, light-clay, on loess of slopes	4095
76д	Southern Chernozems, low-humus, severely eroded, medium-loamy, on loess-like loams underlain by limestone eluvium from 150 cm.	99,8
76е	Southern Chernozems, low-humus, severely eroded, heavy-loamy, on loess-like loams of complex slopes	179,2
76л	Southern Chernozems, low-humus, severely eroded, light-clay, on loess of complex slopes	151,6
85л	Chernozems, slightly eroded, non-saline and slightly saline, light-clay, on dense clays	16,9
85е	Chernozems, slightly eroded, medium-clay, on dense clays of complex slopes	33,6
86е	Chernozems, moderately eroded, medium-clay, on dense clays of complex slopes	304,4
86л	Chernozems, moderately eroded, light-clay, on dense clays of complex slopes	86,7
87е	Chernozems, slightly eroded, non-saline and slightly saline, light-clay, on dense clays	1,8
87л	Chernozems, severely eroded, light-clay, on dense clays of complex slopes	10,1
93д	Chernozems, moderately eroded, medium-loamy, on sands	0,9
102е	Chernozems, moderately and severely eroded, skeletal heavy-loamy, on simple slopes	687
103д	Chernozems, moderately eroded, medium-loamy, on limestone eluvium of complex slopes	391,3
104д	Chernozems, severely eroded, medium-loamy, on limestone eluvium in complex with limestone outcrops (10–30%), on complex slopes	3603,1
104е	Ordinary Chernozems, low-humus, shallow, severely eroded, heavy-loamy, on loess-like loams underlain by limestone eluvium at 0.5–1.0 m	162,3

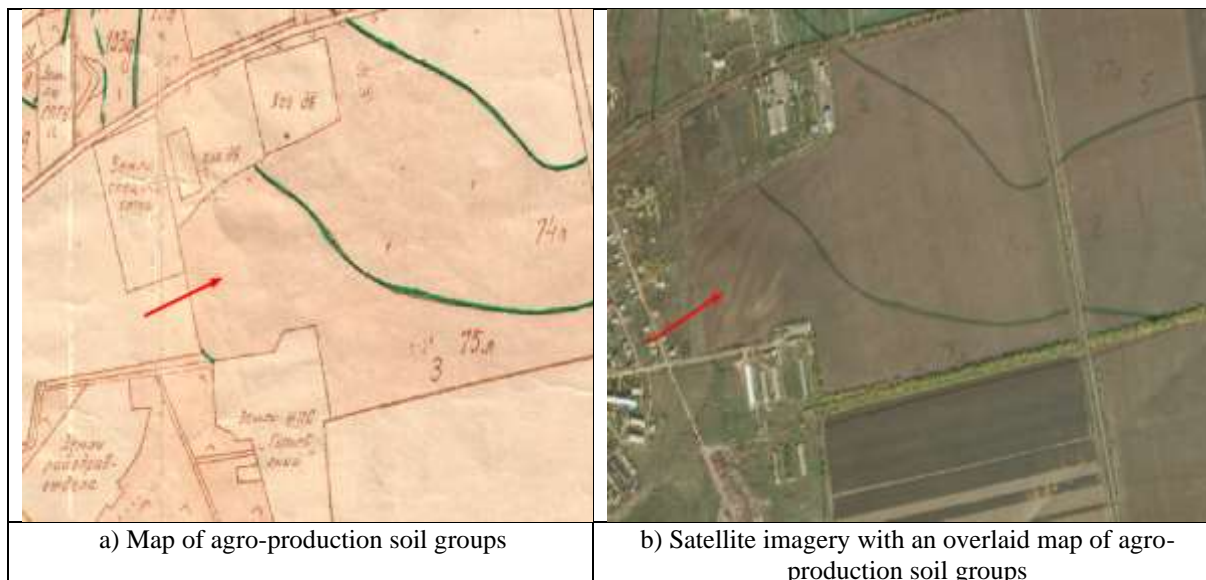


Fig. 3 – Example of the obsolescence of existing maps of agro-production soil groups

color, it is necessary to take into account the presence of a characteristic feathery structure of the image – alternating light and dark stripes oriented parallel to each other. These stripes represent the alternation of runoff depressions, which are weakly manifested in the relief. An

additional important characteristic is the orientation of these stripes perpendicular to the landscape thalwegs (Fig. 4).

For the recognition of linear erosion on satellite images, a set of interpretive features is used, allowing the identification of gullies



a) Mykolaiv region



b) Kharkiv region

Fig. 4 – Example of water erosion identification from remote sensing data

based on their morphology and optical properties. In particular, attention is paid to the specific winding shape and dendritic (tree-like) structure of networks, whose sizes correspond to the scales of fields. In addition, key indicators include: clear alignment of new gullies with old erosion forms, such as ravines; repeatability and preservation of object contours across different

image series; pronounced brightness contrast and characteristic heterogeneous coloring compared to the background image of adjacent arable plots [14].

It should be noted that the distinction between sheet and linear erosion is fairly conditional. On agricultural lands, water does not move as a continuous flow; temporary

streams of equal size always form. Accordingly, in the interpretation of eroded soils, a general delineation is carried out without dividing by erosion types [15,16].

To correct archival cartographic data, a composite image of bare soil was created (based on Sentinel-2 satellite data). To obtain the composite using the Gemini 3.0 artificial intelligence service, a software algorithm was generated for Google Earth Engine.

The algorithm used archival satellite data from the Sentinel-2 constellation for the period 2020–2025. To ensure correct identification of the soil cover specifically, the script applied selection for specific months – March, April, August, September, October. This corresponds to periods of the agricultural cycle when vegetation cover is minimal. Spatially, the search was limited to the boundaries of the NTC with prior filtering by cloudiness level – less than 60% of cloud pixels in the scene.

A key element of the algorithm is the calculation of the Bare Soil Index (BSI). The calculation is performed using a formula that combines the shortwave infrared (SWIR), red (Red), near-infrared (NIR), and blue (Blue) channels:

$$BSI = \frac{(B11 + B4) - (B8 + B2)}{(B11 + B4) + (B8 + B2)}$$

where: B2 - Blue

- B4 - Red

- B8 - NIR (Near-Infrared)

- B11 - SWIR1 (Short-wave Infrared 1)

This index allows effective differentiation of bare soil areas from vegetation and built-up territories. BSI is a normalized difference index, its values theoretically range from -1 to 1. Positive values correspond to areas with high reflectance in the shortwave infrared and red spectra compared to near-infrared and blue. This is characteristic of bare soils, sand, and anthropogenic objects.

Negative values are typical for surfaces with high chlorophyll content (active vegetation) or water bodies. Since vegetation intensely reflects light in the NIR range (B8), the denominator of the formula increases, and the numerator becomes negative, resulting in negative index values.

To select “pure” soil pixels, a two-level filtering system is implemented in the algorithm. At the first level, masking is carried out using the Scene Classification classifier. This is a built-in Sentinel-2 layer, where only pixels classified as “vegetation” and “bare soil” remain. At the second level, filtering is performed by BSI values > 0. This allows exclusion of residual dry vegetation and pastures, leaving only arable land or areas with minimal chlorophyll content in the collection..



a) satellite image, Google



b) Bare Soil Index

Fig. 5 – Result of constructing the Bare Soil Index in the Google Earth Engine service.

To obtain the final result, a median reduction method is applied to the filtered image collection. Choosing the median instead of the mean minimizes the influence of random outliers, such as residual cloud shadows or artifacts, and provides the most spectrally representative state of the soil over a five-year period.

The final image includes spectral channels B2, B3, B4, B8, B11, and a separate BSI layer (Fig. 5). Export of the results is configured in the “UTM zone 36N” coordinate system with a spatial resolution of 10 meters per pixel. Analysis of the BSI layer (Fig. 5) shows that it is not

possible to completely eliminate the influence of vegetation, which is manifested as a mosaic in the image along the field boundaries. This is due to the short five-year period of analysis and the widespread use of no-till technology, under which the surface is constantly covered with vegetation or its residues. At the same time, combining the BSI layer with high-resolution images (Google, Bing, ESRI) made it possible to create a map of severely washed soils and outcrops of parent rocks of the Novoodeska community (Fig. 6) at a scale of 1:10,000 [17]. According to updated data, their area is 12,027.6 ha

Discussion

The results of the conducted study confirm the need to update cartographic data on the state of Ukraine’s soil cover, since soil maps compiled in the 1990s – early 2000s are now significantly outdated. Comparative analysis showed that archival data do not reflect the actual scale of degradation. For instance, according to old maps, the area of severely washed soils in the Novoodeska community was about 5,214 ha, whereas according to refined remote sensing data, this figure increased to 12,027.6 ha. This discrepancy is explained not only by the intensification of erosion processes over the last 20–30 years but also by the limited technical capabilities of the previous century, which did not allow for high-resolution monitoring.

The use of the cloud platform Google Earth Engine (GEE) demonstrates a significant methodological advantage in the processing of large geospatial data, providing the scientific community with free access to vast remote sensing datasets. GEE fundamentally changes not only the location of computations but also the strategy for geospatial research development, as it enables instant work with multi-year satellite archives without the need to download data or manage local storage. This opens opportunities for implementing multi-scale and multi-temporal projects, such as global time series, which are often infeasible on conventional desktop computers [18,19].

The platform eliminates the need for separate stages of data acquisition and preprocessing, instead offering globally consistent and reproducible workflows based on curated collections. The latter term refers to a set of carefully selected, systematized, and preprocessed datasets [20]. Specialists from Google and partner organizations (e.g., NASA)

perform extensive preparatory work on standardization, preprocessing, quality control, and data updating.

Thanks to automatic parallelization of analysis within Google’s infrastructure, processing geospatial data at a planetary scale is reduced from months to mere hours. A striking example of such efficiency is the study by Hansen et al. [21], in which approximately 707 terabytes of Landsat-7 imagery were processed to create a global forest map in just 100 hours – a task that would have taken a million hours outside of GEE.

An important analysis tool was the Bare Soil Index (BSI), which allows clear differentiation of bare surfaces from vegetation by combining spectral channels, where high reflectance in the shortwave infrared and red bands indicates exposed soil. However, as the study showed, even a five-year analysis period and the use of BSI do not entirely eliminate the influence of vegetation. This is due to the specifics of modern agriculture, particularly the widespread adoption of no-till technology, where soil remains constantly covered with crop residues, creating a “mosaic” in the imagery.

Combining automated indices with visual analysis allowed the creation of an updated map of severely washed soils of the community at a scale of 1:10,000, which will be useful in the development of the Comprehensive Plan for Spatial Development of the Territory.

The resulting layer of severely washed soils can also serve as a training dataset for further remote studies of the soil cover in Mykolaiv region.

The conducted mapping is also strategically important for ensuring food security and reducing greenhouse gas emissions, as

erosion intensifies the mineralization of organic matter. The use of artificial intelligence for algorithm development in GEE (as was done

with Gemini 3.0 in this work) opens new prospects for operational monitoring of land resources at regional and national levels

Conclusions

Existing soil maps of the Novoodeska territorial community, compiled at the end of the 20th century, significantly underestimate the current scale of land degradation. A substantial portion of areas previously classified as moderately washed now exhibit signs of severe erosion.

The use of the cloud platform Google Earth Engine and Sentinel-2 satellite data is an effective method for creating seamless bare soil maps. This allows mitigation of disturbances from vegetation and cloud cover, ensuring high-accuracy monitoring over large areas.

Within the study, a new map of severely

washed soils and outcrops of parent rocks of the NTC was developed at a scale of 1:10,000. The area of severely washed soils is 12,027.6 ha, more than twice the archival data. The resulting map is important for the development of the Comprehensive Plan for Spatial Development of the Territory and for implementing soil protection measures.

For achieving maximum accuracy, it is advisable to combine automated indices (BSI) with visual interpretation of linear and sheet erosion features, which helps avoid errors associated with the natural heterogeneity of the soil cover.

Conflict of Interest

This work was carried out within the framework of the project “DIY4Change for green recovery and sustainable development of 2 communities of Mykolaiv region,” implemented by the NGO “Mykolaiv City Development Fund” with support from the International Renaissance Foundation. The material represents the position of the authors and does not necessarily reflect the position of the IRF.

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this manuscript. The authors fully adhered to ethical standards, including issues of plagiarism, data fabrication, and duplicate publication.

Author Contributions: The authors contributed equally to this work.

AI Statement

Gemini 3.0 artificial intelligence was used to write a software algorithm for generating composite images of open ground using Sentinel-2 data (Google Earth Engine).

References

1. Verkhovna Rada of Ukraine. (2022). On approval of the Concept of the National Target Program for land use and protection (Order No. 70-r). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/70-2022-%D1%80#Text> (in Ukrainian).
2. *Overview of soil conditions of arable land in Ukraine*. (2020). FAO. <https://doi.org/10.4060/ca7761en> (in Ukrainian).
3. Achasov, A., Achasova, A., Titenko, G., Seliverstov, O., & Krivtsov, V. (2021). Assessment of the Ecological Condition of Soil Cover Based on Remote Sensing Data: Erosional Aspect. *SHS Web of Conferences*, 100, 05014. <https://doi.org/10.1051/shsconf/202110005014>
4. Wang, J., Yang, J., Li, Z., Ke, L., Li, Q., Fan, J., & Wang, X. (2024). Research on Soil Erosion Based on Remote Sensing Technology: A Review. *Agriculture*, 15(1), 18. <https://doi.org/10.3390/agriculture15010018>
5. Seutloali, K. E., Dube, T., & Mutanga, O. (2017). Assessing and mapping the severity of soil erosion using the 30-m Landsat multispectral satellite data in the former South African homelands of Transkei. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 100, 296–304. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2016.10.001>
6. Polovina, S., Radić, B., Ristić, R., & Milčanović, V. (2024). Application of Remote Sensing for Identifying Soil Erosion Processes on a Regional Scale: An Innovative Approach to Enhance the Erosion Potential Model. *Remote Sensing*, 16(13), 2390. <https://doi.org/10.3390/rs16132390>
7. Žižala, D., Juřicová, A., Zádorová, T., Zelenková, K., & Minařík, R. (2018). Mapping soil degradation using remote sensing data and ancillary data: South-East Moravia, Czech Republic. *European Journal of Remote Sensing*, 52(sup1), 108–122. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1482524>

8. Malinowski, R., Heckrath, G., Rybicki, M., & Eltner, A. (2022). Mapping rill soil erosion in agricultural fields with UAV-borne remote sensing data. *Earth Surface Processes and Landforms*. <https://doi.org/10.1002/esp.5505>
9. Wang, B., Zhang, Z., Wang, X., Zhao, X., Yi, L., & Hu, S. (2021). The Suitability of Remote Sensing Images at Different Resolutions for Mapping of Gullies in the Black Soil Region, Northeast China. *Remote Sensing*, 13(12), 2367. <https://doi.org/10.3390/rs13122367>
10. Britannica Editors (2019, September 24). Chernozem. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/Chernozem-FAO-soil-group>
11. Sentinel-2. Copernicus Data Space Ecosystem. <https://dataspace.copernicus.eu/data-collections/copernicus-sentinel-data/sentinel-2>
12. Google Earth Engine. Google Earth Engine. <https://earthengine.google.com/>
13. Amani, M., Ghorbanian, A., Ahmadi, S. A., Kakooei, M., Moghimi, A., Mirmazloumi, S. M., Moghaddam, S. H. A., Mahdavi, S., Ghahremanloo, M., Parsian, S., Wu, Q., & Brisco, B. (2020). Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 5326–5350. <https://doi.org/10.1109/jstars.2020.3021052>
14. Achasov, A., & Achasova, A. (2020). Features of Visual Decoding of Water Erosion by Remote Sensing Data. *Man and Environment. Issues of Neoeology*, (33). <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2020-33-13> (in Ukrainian).
15. Achasov, A. B., Achashova, A. O., Buligin, S. Yu., et al. (2010). *Large-scale soil mapping using integrated analysis of remote sensing data and digital elevation models: Methodological recommendations*. Kharkiv National Agrarian University. (in Ukrainian).
16. Achasov, A. B. (2016). *Anti-erosion optimization of agricultural landscapes: A geoinformation approach*. Kharkiv National Agrarian University. (in Ukrainian).
17. Achasov, A., Dyadin, D., Sinna, O., & Siedov, A. (2026). *Maps for the EcoProfile: Novoodeska territorial community*. International Renaissance Foundation; Foundation for the Development of Modern Media. https://nodmr.gov.ua/images/kontent/side_menu/Stratehiya_ta_investytsiyina/2025/ЕкоПро-фільм_A4_HTГ_1.pdf (in Ukrainian).
18. Tamiminia, H., Salehi, B., Mahdianpari, M., Quackenbush, L., Adeli, S., & Brisco, B. (2020). Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 164, 152–170. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001>
19. Velastegui-Montoya, A., Montalván-Burbano, N., Carrión-Mero, P., Rivera-Torres, H., Sadeck, L., & Adami, M. (2023). Google Earth Engine: A Global Analysis and Future Trends. *Remote Sensing*, 15(14), 3675. <https://doi.org/10.3390/rs15143675>
20. Schmitt, M., Hughes, L. H., Qiu, C., & Zhu, X. X. (2019). SEN12MS & NDASH; A curated dataset of georeferenced multi-spectral Sentinel-1/2 imagery for deep learning and data fusion. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-2/W7, 153–160. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-iv-2-w7-153-2019>
21. Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S. J., Loveland, T. R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C. O., & Townshend, J. R. G. (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 342(6160), 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>

Submission received: 24.01.2026 / Revised: 26.02.2026 / Accepted: 06.03.2026 / Published: 30.05.2026

А. Б. АЧАСОВ¹, д-р с.-г. наук, проф.
професор кафедри екології та менеджменту довкілля
e-mail: achasov@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2446-3707>

О. Ю. СЕЛІВЕРСТОВ¹,
викладач кафедри екології та менеджменту довкілля
e-mail: oleg.seliverstov@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8477-274X>

Г. В. ТІТЕНКО¹, канд. географ. наук, доц.,
доцент кафедри екології та менеджменту довкілля
e-mail: titenko@karazin.ua ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8477-0672>

Р. Р. КАЛАШНІКОВ¹,
Бакалавр
e-mail: ruslan.kalashnikov@student.karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-3616-400X>

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

ДОСВІД КАРТОГРАФУВАННЯ ЕРОДОВАНИХ ҐРУНТІВ НА ОСНОВІ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ

Мета. Можливості сучасних даних дистанційного зондування Землі та геоінформаційних технологій для ідентифікації та великомасштабного картографування еродованих ґрунтів з особливим акцентом на виявлення площинної водної ерозії, яка залишається недостатньо представленою на наявних ґрунтових картах України.

Методи. Обробку даних виконано на платформі Google Earth Engine шляхом формування композитного зображення відкритого ґрунту на основі індексу Bare Soil Index (BSI), масок сенової класифікації та медіанної редукції пікселів. Ідентифікацію еродованих ділянок здійснювали методом візуального дешифрування з урахуванням спектральних, просторових і морфологічних ознак водної ерозії.

Результати. Дослідження проведено на території Новоодеської територіальної громади Миколаївської області з використанням архівних карт агропромислових груп ґрунтів масштабу 1:10 000 та багатотемпоральних супутникових знімків Sentinel-2 за період 2020–2025 рр. Встановлено суттєві розбіжності між архівними ґрунтовими картами та сучасним просторовим розподілом еродованих ґрунтів, що свідчить про посилення деградаційних процесів упродовж останніх десятиліть. Застосування багатотемпоральних композитів відкритого ґрунту забезпечило надійне виділення сильноеродованих ґрунтів і виходів материнських порід у межах сільськогосподарських ландшафтів. У результаті створено актуалізовану великомасштабну карту сильноеродованих ґрунтів у масштабі 1:10 000, яка істотно перевищує за детальністю та достовірністю наявні картографічні матеріали.

Висновок. Інтеграція багатотемпоральних супутникових знімків Sentinel-2 та хмарного геоінформаційного аналізу значно підвищує точність картографування водної ерозії, особливо її площинних форм. Запропонований підхід є ефективним інструментом для оновлення ґрунтово-картографічних матеріалів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: водна ерозія, еродовані ґрунти, дистанційне зондування Землі, Sentinel-2, Google Earth Engine, ґрунтове картографування

Конфлікт інтересів

Робота виконана в рамках проекту «DIY4Change для зеленого відновлення та сталого розвитку 2 громад Миколаївської області», що реалізується ГО «Фонд розвитку міста Миколаїв» за підтримки Міжнародного фонду «Відродження». Матеріал відображає позицію авторів і не обов'язково відображає позицію IRF.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису. Автори повністю дотримувалися етичних стандартів, включаючи питання плагіату, фальсифікації даних та дублювання публікацій.

Внесок авторів: Автори зробили рівний внесок у цю роботу.

Декларація про використання ШІ

Штучний інтелект Gemini 3.0 застосовано для написання програмного алгоритму для генерації композитних знімків відкритого ґрунту за даними Sentinel-2 (сервіс Google Earth Engine).

Список використаної літератури

1. Верховна Рада України. Про схвалення Концепції Загальнодержавної цільової програми використання та охорони земель. 2022. № 70-р, ст. 141. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/70-2022-%D1%80#Text> (дата звернення: 21.01.2026).
2. Огляд стану ґрунтів орних земель України – дослідження для степової та лісостепової зон. Будапешт, Угорщина : FAO, 2020. 64 с. <https://doi.org/10.4060/ca7761en>
3. Achasov A., Achasova A., Titenko G., Seliverstov O., Krivtsov V.. Оцінка екологічного стану ґрунтового покриття на основі даних дистанційного зондування: ерозійний аспект. *SHS Web of Conferences*. 2021. Т. 100. С. 05014. <https://doi.org/10.1051/shsconf/202110005014>
4. Wang J., Yang J., Li Z., Ke L., Li Q., Fan J., Wang X.. Дослідження ерозії ґрунтів на основі технологій дистанційного зондування: огляд. *Agriculture*. 2024. Т. 15, № 1. С. 18. <https://doi.org/10.3390/agriculture15010018>
5. Seutloali, K.E.; Timothy, D.; Onisimo, M. Оцінювання та картографування інтенсивності ерозії ґрунтів із використанням 30-м багатоспектральних супутникових даних Landsat на території колишніх південноафриканських голландів Транскею. *Phys. Chem. Earth*. 2016. Т. 100. С. 296–304.
6. Polovina S., Radić B., Ristic R., Milčanović V. Застосування дистанційного зондування для ідентифікації ерозійних процесів ґрунтів на регіональному рівні: інноваційний підхід до вдосконалення моделі ерозійного потенціалу. *Remote Sensing*. 2024. Т. 16, № 13. С. 2390. <https://doi.org/10.3390/rs16132390>
7. Žižala D., Juřicová A., Zádorová T., Zelenková K., Minařík R.. Картографування деградації ґрунтів із використанням даних дистанційного зондування та допоміжних даних: Південно-Східна Моравія, Чеська Республіка. *European Journal of Remote Sensing*. 2018. Т. 52, дод. 1. С. 108–122. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1482524>
8. Malinowski R., Heckrath G., Rybicki M., Eltner A.. Картографування борознаної ерозії ґрунтів на сільськогосподарських полях за допомогою БПЛА-даних дистанційного зондування. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2022. <https://doi.org/10.1002/esp.5505>
9. Wang, B.; Zhang, Z.; Wang, X.; Zhao, X.; Yi, L.; Hu, S. Придатність дистанційних знімків різної просторової роздільної здатності для картографування ярів у регіоні чорноземів Північно-Східного Китаю. *Remote Sens.* 2021, 13, 2367. <https://doi.org/10.3390/rs13122367>
10. Britannica Editors Chernozem. Encyclopedia Britannica. 2019. URL: <https://www.britannica.com/science/Chernozem-FAO-soil-group> (дата звернення: 21.01.2026)
11. Sentinel-2. Copernicus Data Space Ecosystem. URL: <https://dataspace.copernicus.eu/data-collections/copernicus-sentinel-data/sentinel-2>
12. Google Earth Engine. Google Earth Engine. URL: <https://earthengine.google.com>
13. Amani, M., Ghorbanian, A., Ahmadi, S. A., Kakooei, M., ... & Brisco, B. (2020). Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 5326–5350. <https://doi.org/10.1109/jstars.2020.3021052>
14. Ачасов А. Б., Ачасова А. О. Особливості візуального дешифрування водної ерозії за даними дистанційного зондування. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2020. № 33. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2020-33-13>
15. Ачасов А. Б., Ачасова А. О., Булигін С. Ю. та ін. Великомасштабне картографування ґрунтів за допомогою інтегрального аналізу даних дистанційного зондування й цифрових моделей рельєфу. Методичні рекомендації. Харків : ХНАУ, 2010. 47 с.;
16. Ачасов А. Б. Протиерозійна оптимізація агроландшафтів: геоінформаційний підхід. Харків : Харк. нац. аграр. ун-т, 2016. 409 с.
17. Ачасов А., Дядін Д., Сінна О., Седов А.. Карти до ЕкоПрофілю – Новоодеська територіальна громада. Міжнародний фонд «Відродження», ФРММ, 2026. 16 с. URL: [https://nodmr.gov.ua/images/kontent/side menu/Stratehiya ta investytsiyana/2025/ЕкоПрофіль_A4_HTT_1.pdf](https://nodmr.gov.ua/images/kontent/side_menu/Stratehiya_ta_investytsiyana/2025/ЕкоПрофіль_A4_HTT_1.pdf)
18. H. Tamiminia, B. Salehi, M. Mahdianpari, L. Quackenbush, S. Adeli, B. Brisco. Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2020. Т. 164. С. 152–170. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001>
19. Velastegui-Montoya, A., Montalván-Burbano, N., Carrión-Mero, P., Rivera-Torres, H., Sadeck, L., Adami, M. Google Earth Engine: A Global Analysis and Future Trends. *Remote Sensing*. 2023. Т. 15(14). С. 3675. <https://doi.org/10.3390/rs15143675>
20. Schmitt M., Hughes L., Qiu C., Zhu X.. SEN12MS & NDASH; A curated dataset of georeferenced multi-spectral Sentinel-1/2 imagery for deep learning and data fusion. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2019. IV-2/W7. С. 153–160. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-iv-2-w7-153-2019>
21. Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., ... Townshend J. R. G.. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*. 2013. Т. 342, № 6160. С. 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>

Отримано: 24.01.2026 / Переглянуто: 26.02.2026 / Прийнято: 06.03.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

<https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-02>
УДК (UDC): 911.375.5:712.2:504.03(477.54-25)

А. Н. НЕКОС, д-р географ. наук, проф.,
професорка кафедри екологічного моніторингу та заповідної справи
e-mail: nekos@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1852-0234>
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

В. В. МІРОШНИЧЕНКО
заступник директора
e-mail: vmiroshnichenke@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6785-6351>
ТОВ "ВДМ-Україна",
вул. Каштанова, 16, м. Дніпро, 49051, Україна

ТРАНСФОРМАЦІЯ КУЛЬТУРНИХ ЛАНДШАФТІВ УРБОГЕОСИСТЕМИ ХАРКОВА В УМОВАХ ВОЄННОГО ВПЛИВУ: КОНСТРУКТИВНО-ГЕОГРАФІЧНИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНЮВАННЯ ТА ВІДНОВЛЕННЯ

Мета. Обґрунтувати конструктивно-географічний підхід до оцінювання трансформації культурних ландшафтів урбогеосистеми Харкова в умовах воєнного впливу та визначити напрями їх збереження, оптимізації й інтеграції у систему післявоєнного екологічно збалансованого відновлення міста.

Методи. Системний аналіз, порівняльно-географічний, картографічний, геоінформаційний, типологічний та експертно-оціночний підходи.

Результати. Культурні ландшафти розглянуто як складові природно-господарської територіальної системи міста, що поєднують природну основу, антропогенну забудову, функціональне використання території, історико-культурну пам'ять, візуально-ландшафтні характеристики та безпекові параметри. Показано, що воєнний вплив спричинив не лише фізичне пошкодження культурних об'єктів і міських просторів, а й зміну функцій, символічного значення, візуальної цілісності, рекреаційного потенціалу та сприйняття міського середовища. Запропоновано замінити вузьке поняття «відеоєкологія» ширшою категорією «візуально-ландшафтна комфортність міського середовища». Розроблено систему критеріїв оцінювання сучасного стану культурних ландшафтів, що включає просторовий, екологічний, культурний, функціональний, воєнно-трансформаційний, візуально-ландшафтний та управлінський блоки.

Висновки. Культурні ландшафти Харкова доцільно розглядати як ресурс міської стійкості, екологічної безпеки, просторової спадкоємності, локальної ідентичності та післявоєнного відновлення. Їх оцінювання має бути інтегроване у GIS-моніторинг, зелену інфраструктуру, програми охорони спадщини, меморіалізації та просторового планування міста.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: культурний ландшафт, урбогеосистема, Харків, екологічна безпека, візуально-ландшафтна комфортність, післявоєнне відновлення

Як цитувати: Некос А. Н., Мірошніченко В. В. Трансформація культурних ландшафтів урбогеосистеми Харкова в умовах воєнного впливу: конструктивно-географічний підхід до оцінювання та відновлення. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2026. Вип. 45. С. 21–30. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-02>

In cites: Nekos, A. N., & Miroshnychenko, V. V. (2026). Transformation of cultural landscapes of the Kharkiv urban geosystem under war impact: constructive-geographical approach to assessment and recovery. *Man and Environment. Issues of Neoecology*, (45), 21–30. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-02> (in Ukrainian)

Вступ

Культурні ландшафти урбанізованих територій є складними природно-антропогенними утвореннями, у яких поєднуються природна основа міської території, історично сформована забудова, функціональне використання простору, соціальна пам'ять, символічні

значення, естетичні характеристики та сучасні форми природокористування. У межах конструктивної географії такі ландшафти доцільно розглядати не лише як об'єкти спадщини або елементи міського образу, а як компоненти природно-господарської територіальної сис-

теми, що впливають на якість середовища проживання, рекреаційний потенціал, екологічну безпеку, просторову організацію міста та напрями його збалансованого розвитку. Такий підхід відповідає предметному полю спеціальності 11.00.11 – конструктивна географія і раціональне використання природних ресурсів [1].

Європейська ландшафтна конвенція визначає ландшафт як територію, сприйняттю людьми, характер якої є результатом дії та взаємодії природних і людських чинників [2]. У культурно-географічній традиції ця ідея розвиває класичне розуміння ландшафту як результату дії культури на природну основу [3]. Для урбанізованих територій це означає, що місто не може бути зведене лише до забудови або адміністративної структури: воно є багаторівневою урбогеосистемою, у якій природні, антропогенні, соціальні, екологічні та символічні процеси взаємодіють у межах конкретної території.

Дослідження культурних ландшафтів Харкова вже порушували питання географічного і правового статусу культурного ландшафту, а також оцінювання комфортності візуального середовища урбогеосистеми [4, 5]. Однак сучасні умови потребують оновлення цих підходів. Воєнний вплив після 2022 року змінив матеріальний стан міських просторів, функціональне використання територій, рівень безпеки, характер візуального сприйняття, символічне значення пошкоджених об'єктів і роль зелених зон у відновленні населення.

Сучасні міжнародні методики оцінювання ландшафтного характеру та візуального впливу дають можливість аналізувати не лише морфологію території, а й її чутливість до змін, просторову цілісність, характер сприйняття та управлінські орієнтири [6; 7]. Водночас концепція образу міста К. Лінча дозволяє оцінювати роль шляхів, меж, районів, вузлів і орієнтирів у формуванні ментальної структури міського простору [8]. Для Харкова ці підходи важливі через зміну функцій окремих районів, пошкодження візуальних доміант і появу нових просторів пам'яті.

Дослідження екологічної психології доводять значення природного й візуально збалансованого середовища для психологічного відновлення людини [9–11]. Міські зелені простори та водні об'єкти з прибережними зонами забезпечують широкий спектр екосистемних послуг, серед яких регулювання мікроклімату, зменшення шумового навантаження, підтримання біорізноманіття, рекреація та соціальна взаємодія [12]. У цьому контексті

культурні ландшафти мають розглядатися не як пасивна спадщина, а як ресурс міської стійкості [13, 14].

Міжнародні документи UNESCO щодо впровадження Конвенції про всесвітню спадщину розглядають культурні ландшафти як результат взаємодії природи і людини, що відображає історичну еволюцію суспільства та його адаптацію до природного середовища [15]. В умовах війни ця проблематика набуває особливої актуальності. За даними UNESCO, станом на 15 квітня 2026 року в Україні верифіковано 526 пошкоджених культурних об'єктів [16]. За інформацією Міністерства культури та стратегічних комунікацій України, станом на 25 березня 2025 року пошкоджено 1419 об'єктів культурної спадщини, а найбільша кількість таких об'єктів припадала на Харківську область – 329 [17].

Післявоєнне відновлення України має безпосередній просторовий, екологічний і культурно-ландшафтний вимір. Оновлена оцінка потреб відновлення та реконструкції України визначає загальну потребу у 524 млрд доларів США протягом наступного десятиліття [18]. Для Харкова вже розробляються міжнародні планувальні підходи, зокрема в межах Kharkiv Masterplan [19]. Водночас принципи Нового європейського Баугаузу акцентують поєднання стійкості, інклюзивності та естетичної якості простору [20], що є безпосередньо релевантним для відновлення культурних ландшафтів міста.

Метою статті є обґрунтування конструктивно-географічного підходу до оцінювання трансформації культурних ландшафтів урбогеосистеми Харкова в умовах воєнного впливу та визначення напрямів їх збереження, оптимізації й інтеграції у систему післявоєнного екологічно збалансованого відновлення міста.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

- уточнити зміст культурного ландшафту урбогеосистеми в контексті конструктивної географії;
- обґрунтувати доцільність використання поняття «візуально-ландшафтна комфортність міського середовища»;
- визначити основні напрями воєнної трансформації культурних ландшафтів Харкова;
- запропонувати критерії оцінювання сучасного стану культурних ландшафтів;
- окреслити конструктивно-географічні напрями їх післявоєнного відновлення.

Об'єкт та методи дослідження

Об'єктом дослідження є культурні ландшафти урбогеосистеми Харкова. Предметом дослідження є конструктивно-географічні особливості їх трансформації, оцінювання та післявоєнної оптимізації як складників екологічної безпеки, просторової організації та збалансованого природокористування.

Методологічною основою є конструктивно-географічний підхід, за яким культурні ландшафти розглядаються як елементи природно-господарської територіальної системи міста [1]. Інформаційну базу становлять опубліковані наукові праці з культурно-ландшафтної проблематики Харкова [4, 5], міжнародні документи у сфері ландшафтної політики та охорони спадщини [2, 15], відкриті матеріали щодо воєнного пошкодження культурної спадщини [16, 17], а також сучасні підходи до відновлення міст України [18–20].

У дослідженні використано системний аналіз, порівняльно-географічний метод, метод типологізації, картографічний і геоінформаційний аналіз, експертне оцінювання, елементи ландшафтно-візуальної оцінки та конструктивно-географічне узагальнення.

Системний підхід застосовано для розгляду Харкова як урбогеосистеми, де культурні ландшафти функціонують у взаємозв'язку з природними компонентами, забудовою, транспортною мережею, зеленими зонами, водними об'єктами, промисловими територіями, об'єктами спадщини та соціальними практиками населення.

Порівняльно-географічний метод використано для зіставлення довоєнного та сучасного стану культурних ландшафтів. Порівняння здійснюється за такими напрямками: збереженість просторової структури, функціональна трансформація, ступінь пошкодження, зміна візуально-ландшафтних характеристик, втрата або збереження історико-культурної цінності, зміна рекреаційного потенціалу, поява територій з меморіальними і белігеративними функціями.

Метод типологізації застосовано для систематизації культурних ландшафтів за походженням, функціями, просторовим масштабом, рівнем антропогенної трансформації та сучасним станом. До аналізу залучено селитебні, сакральні, тафальні, рекреаційні, проми-

слові, дорожні, меморіальні, беліге-ративні, історико-архітектурні та асоціативні культурні ландшафти. Малі архітектурні форми доцільно розглядати не як самостійний клас культурних ландшафтів, а як мікроструктурні елементи або візуально-семантичні маркери.

Для аналізу сучасного стану культурних ландшафтів запропоновано додаткову типологію за ступенем воєнної трансформації: збережені, частково трансформовані, пошкоджені, критично деградовані, нові меморіальні та белігеративні, а також ландшафти пріоритетного післявоєнного відновлення.

Картографічний і геоінформаційний аналіз розглядається як базовий інструмент сучасного оцінювання. Доцільним є формування багатосарової GIS-бази культурних ландшафтів Харкова, яка має включати межі культурно-ландшафтних об'єктів, об'єкти культурної спадщини, зелені зони, водні об'єкти, рекреаційні території, промислові ландшафти, житлові масиви, транспортні коридори, зони пошкоджень, об'єкти потенційної меморіалізації, простори підвищених безпекових ризиків та території пріоритетного відновлення.

На відміну від термінології, що використовувала поняття «відеоєкологічна комфортність» [5], пропонується застосовувати поняття «візуально-ландшафтна комфортність міського середовища». Воно охоплює різноманітність і масштабність забудови, наявність природних елементів, збереженість історичних доміант, композиційну цілісність, ступінь руйнування, наявність агресивних або травматичних візуальних елементів, доступність зелених просторів і психологічну безпечність середовища.

Для операціоналізації запропонованого конструктивно-географічного підходу сформовано систему критеріїв оцінювання сучасного стану культурних ландшафтів Харкова. Вона поєднує просторові, екологічні, культурні, функціональні, воєнно-трансформаційні, візуально-ландшафтні та управлінські параметри, що дає змогу розглядати культурний ландшафт не лише як об'єкт спадщини, а як складову урбогеосистеми, ресурс екологічної безпеки, міської стійкості та післявоєнного відновлення. Узагальнення відповідних блоків і критеріїв оцінювання подано в таблиці 1.

Таблиця 1

Критерії оцінювання сучасного стану культурних ландшафтів Харкова

Table 1

Criteria for assessing the current state of Kharkiv cultural landscapes

Блок оцінювання/ Evaluation block	Основні критерії/ Main criteria
Просторовий / Spatial	Площа, межі, доступність, зв'язність із міською структурою, положення у системі зелених і транспортних коридорів /Area, boundaries, accessibility, connectivity with the urban structure, position in the system of green and transport corridors
Екологічний / Ecological	Наявність зелених насаджень, водних об'єктів, мікрокліматична роль, рекреаційний потенціал, екологічні ризики, участь у формуванні екосистемних послуг /Presence of green spaces, water bodies, microclimatic role, recreational potential, environmental risks, participation in the formation of ecosystem services
Культурний / Cultural	Історико-культурна цінність, символічність, збереженість спадщини, роль у міській ідентичності /Historical and cultural value, symbolism, preservation of heritage, role in urban identity
Функціональний / Functional	Сучасне використання, зміна функцій, інтенсивність антропогенного навантаження, потенціал адаптивного використання /Modern use, change of functions, intensity of anthropogenic load, potential for adaptive use
Воєнно-трансформаційний / Military-transformational	Ступінь пошкодження, наявність руйнувань, безпекові ризики, поява меморіальних або бelligerent функцій /Degree of damage, presence of destruction, security risks, emergence of memorial or belligerent functions
Візуально-ландшафтний / Visual-landscape	Композиційна цілісність, естетична виразність, масштабність, візуальна деградація, наявність травматичних візуальних елементів /Compositional integrity, aesthetic expressiveness, scale, visual degradation, presence of traumatic visual elements
Управлінський /Management	Охоронний статус, наявність проектів відновлення, пріоритетність реконструкції, можливість інтеграції у стратегії післявоєнного розвитку /Protection status, presence of restoration projects, priority of reconstruction, possibility of integration into post-war development strategies

Оцінювання за кожним блоком може здійснюватися за п'ятибальною шкалою, де 1 бал означає критично несприятливий стан або низьку значущість критерію, а 5 балів – високий рівень збереженості, значущості

або відновлювального потенціалу. На основі інтегральної оцінки культурні ландшафти можуть бути віднесені до груп низького, середнього або високого пріоритету післявоєнного відновлення.

Результати та обговорення

У межах конструктивної географії культурний ландшафт урбанізованої території доцільно розглядати як функціональний компонент природно-господарської територіальної системи міста. У такій інтерпретації він є не лише «видимим образом» території, а й носієм екологічних, соціальних, рекреаційних, історико-культурних і безпекових функцій.

Урбогеосистема Харкова сформувалася як складна поліфункціональна система, у якій природна основа території, зелені масиви, водні об'єкти з річковими долинами,

вододільні простори, транспортні осі, промислові зони, житлові райони, історична забудова, сакральні об'єкти, меморіальні простори та громадські території утворюють взаємопов'язану культурно-ландшафтну структуру. Тому об'єктами аналізу мають бути не лише окремі пам'ятки архітектури, а й цілісні територіальні комплекси.

Воєнний вплив на культурні ландшафти Харкова має багатовимірний характер. Він проявляється у фізичному руйнуванні будівель і просторів, зміні функцій, символічних значень, візуального сприйняття,

доступності, безпечності та екологічного стану міських територій. Руйнування окремого об'єкта може спричинити втрату не лише матеріальної оцінки, а й порушення просторової цілісності ширшого ландшафтного комплексу.

Першим напрямом трансформації є фізичне пошкодження матеріальної структури ландшафтів. Йдеться про історичні будівлі, сакральні споруди, заклади культури, житлову забудову, громадські простори, меморіальні об'єкти, фасади, елементи благоустрою та зелені насадження. Дані UNESCO і Міністерства культури та стратегічних комунікацій України підтверджують значні масштаби пошкодження культурної спадщини України, зокрема Харківщини [16, 17].

Другим напрямом є функціональна трансформація міського простору. Території, які до війни виконували рекреаційні, туристичні, освітні або естетичні функції, у сучасних умовах можуть ставати просторами обмеженого доступу, небезпеки, евакуації, волонтерської активності, тимчасового укриття або пам'яті. Безпека, наявність укриттів, транспортна доступність, стан інфраструктури та психологічне сприйняття території з наслідками фізіологічних змін у стані здоров'я населення стали не менш важливими, ніж її естетична привабливість.

Третім напрямом є формування нових або актуалізація наявних меморіальних і белігеративних ландшафтів. Місця руйнувань, пошкоджені будівлі, простори оборони, укриття, волонтерські центри, місця пам'яті про загиблих, тимчасові меморіальні знаки та символічно значущі об'єкти стають частиною нової культурно-ландшафтною структури Харкова. У майбутньому такі простори можуть бути інтегровані до системи міської пам'яті, освітніх маршрутів, музейних практик просто неба та програм просторової реконструкції.

Четвертим напрямом є трансформація візуально-ландшафтною комфортності. Війна додала нові чинники: руйнування фасадів, пошкоджені житлові масиви, тимчасові захисні конструкції, закриті вікна, сліди вибухів, порожні простори, фрагментацію забудови, зруйновані доміанти, зміну освітлення, обмеження доступу та постійну присутність безпекових маркерів. Тому візуально-ландшафтна комфортність сьогодні має оцінюватися через поєднання композиційної цілісності, збереженості історичних доміант, стану зелених насаджень і прибережних зон водних об'єктів, рівня візуальної фрагментації,

наявності травматичних елементів і можливості психологічного відновлення.

Запропонована типологія сучасного стану культурних ландшафтів Харкова включає збережені, частково трансформовані, пошкоджені, критично деградовані, нові меморіальні та белігеративні ландшафти, а також ландшафти пріоритетного післявоєнного відновлення. Така типологія є динамічною, оскільки враховує не тільки походження або функцію, а й ступінь трансформації, потенціал відновлення та управлінську доцільність.

Візуально-ландшафтна комфортність має стати одним із критеріїв післявоєнного планування. З позицій екологічної психології природні й візуально збалансовані середовища можуть сприяти психологічному відновленню, зниженню стресу та поліпшенню самопочуття людини [9–11]. У місті, що зазнало масштабного воєнного впливу, відновлення не повинно обмежуватися фізичною реконструкцією будівель. Воно має формувати середовище безпеки, просторової впізнаваності, історичної спадкоємності та щоденного користування.

Культурні ландшафти також є ресурсом міської стійкості. Вони забезпечують просторову спадкоємність, підтримують локальну ідентичність, формують екологічний і рекреаційний потенціал, сприяють соціальному та психологічному відновленню населення. У цьому контексті вони відповідають сучасному розумінню *urban resilience* як здатності міста адаптуватися до криз, відновлювати функції та трансформуватися відповідно до нових умов [13, 14].

Конструктивно-географічні напрями післявоєнного відновлення. Післявоєнне відновлення культурних ландшафтів Харкова має ґрунтуватися не лише на реставрації окремих об'єктів культурної спадщини або реконструкції пошкодженої забудови, а на комплексному конструктивно-географічному підході. Він має поєднувати просторовий аналіз, екологічне оцінювання, ландшафтне планування, охорону спадщини, візуально-ландшафтну реабілітацію та інтеграцію культурних ландшафтів у систему екологічно безпечного розвитку урбогеосистеми.

Першочерговим напрямом має бути створення цифрового кадастру культурних ландшафтів Харкова. Такий кадастр повинен охоплювати не лише пам'ятки архітектури, історії або монументального мистецтва, а й історичні квартали, сакральні

ансамблі, кладовища, меморіальні території, рекреаційні простори, промислові ландшафти, житлові масиви з виразною просторовою ідентичністю, місця воєнної пам'яті та пошкоджені території, що набули нового символічного значення.

Другим напрямом є розроблення системи оцінювання пріоритетності відновлення. Для післявоєнного планування необхідно зафіксувати факт пошкодження, необхідно визначити роль території у структурі міста, втрачені й нові функції, рівень екологічної значущості, рекреаційний потенціал, безпекові умови та можливість адаптивного використання. Такий підхід узгоджується з міжнародними практиками ландшафтного оцінювання та візуального аналізу [6, 7].

Третім напрямом є інтеграція культурних ландшафтів у зелено-блакитну інфраструктуру міста. Зелені простори та міські водні об'єкти, облаштовані джерела забезпечують екосистемні послуги, зокрема поліпшення якості повітря, зменшення шумового забруднення, регулювання температурного режиму, підтримання біорізноманіття, рекреацію, використання чистої джерельної води, та позитивний вплив на здоров'я населення [12]. У післявоєнному Харкові ці функції набувають додаткового значення, оскільки місто потребує не лише фізичної реконструкції, а й екологічної та соціально-психологічної реабілітації.

Четвертим напрямом є візуально-ландшафтна реабілітація пошкоджених територій. Її мета полягає не лише у відновленні фасадів або благоустрою, а у поверненні територіям просторової цілісності, впізнаваності, естетичної виразності та психологічної безпеки. Вона має

базуватися на принципах збереження просторової пам'яті, культурної чутливості, екологічної доцільності, безпечності та психологічної відновлюваності.

Окремим напрямом має стати науково обґрунтована меморіалізація воєнного досвіду. Місця руйнувань, простори оборони, волонтерські осередки, пошкоджені символічні будівлі та території масового переживання небезпеки вже стали частиною нової культурно-ландшафтною структури міста. Рекомендації ICOMOS і UNESCO щодо захисту спадщини у воєнних умовах наголошують на необхідності документування пошкоджень, оцінювання ризиків і поєднання охорони спадщини з потребами громад [23, 24].

Промислові та постпромислові ландшафти Харкова можуть бути трансформовані з проблемних територій у ресурси розвитку. Адаптивне використання таких територій має враховувати ступінь забруднення ґрунтів, техногенне навантаження, історико-промислової цінності, транспортну доступність, можливість озеленення, екологічної реабілітації, створення нових громадських просторів та малих архітектурних форм.

Культурні ландшафти мають бути включені до стратегічних документів післявоєнного розвитку Харкова. Європейський досвід сталого відновлення міст, підходи до інтеграції ландшафту у містобудівну політику та практики підтримки стійкості українських громад свідчать про необхідність поєднання екологічної, соціальної, культурної та інфраструктурної складових реконструкції [21, 22, 25–27]. Водночас у контексті збройного конфлікту важливим залишається захист культурної спадщини від наслідків вибухової зброї та повторних ризиків [28].

Висновки

Культурні ландшафти урбогеосистеми Харкова доцільно розглядати не лише як об'єкти історико-культурної спадщини або естетичного сприйняття міського простору, а як складові природно-господарської територіальної системи міста.

У межах конструктивної географії вони виконують екологічні, рекреаційні, ідентифікаційні, меморіальні, планувальні та безпекові функції.

Воєнний вплив істотно змінив стан, функції та сприйняття культурних ландшафтів, рівень пошкодження, безпекові ризики, втрату або зміну функцій, меморіальне

тів Харкова. Руйнування історичної забудови, житлових масивів, громадських просторів, сакральних, меморіальних і культурних об'єктів спричинило не лише фізичну деградацію окремих територій, а й трансформацію просторової пам'яті, візуальної цілісності, рекреаційного потенціалу та психологічного сприйняття міського середовища.

Довоєнні підходи до аналізу культурних ландшафтів Харкова потребують суттєвого оновлення. У сучасних умовах необхідно враховувати ступінь воєнної трансформації, екологічний потенціал і пріоритетність післявоєнного відновлення.

Запропоновано використовувати поняття «візуально-ландшафтна комфортність міського середовища» як ширшу й методологічно доцільнішу категорію порівняно з вузьким поняттям «відеоєкологія». Вона охоплює цілісність просторової композиції, природні елементи, історичні доміанти, масштабність, безпечність, психологічну прийнятність середовища та його здатність сприяти відновленню психо-фізіологічного стану населення.

Для оцінювання сучасного стану культурних ландшафтів Харкова доцільно застосувати комплексну систему критеріїв, що включає просторовий, екологічний, культурний, функціональний, воєнно-трансформаційний, візуально-ландшафтний та управлінський блоки. Такий підхід дозволяє визначати не лише ступінь пошкодження території, а й її роль у функціонуванні урбогеосистеми.

Культурні ландшафти Харкова мають бути інтегровані до системи зеленої-блакитної інфраструктури міста. Зелені зони, водні об'єкти та прибережні простори,

рекреаційні, сакральні, тафальні, меморіальні можуть виконувати важливі екосистемні послуги щодо регулювання мікроклімату, зменшення шумового й теплового навантаження, підтримання біорізноманіття, створення умов для відпочинку та психо-фізіологічного відновлення населення.

Післявоєнне відновлення Харкова має базуватися на GIS-інвентаризації культурних ландшафтів, ландшафтно-візуальному оцінюванні, визначенні пріоритетів реконструкції, ревіталізації пошкоджених і постпромислових територій, формуванні меморіальних просторів, розвитку міських зелених коридорів та інтеграції безпекових рішень у міське середовище.

Трансформація культурних ландшафтів Харкова в умовах воєнного впливу є не лише проблемою охорони спадщини, а й комплексним завданням конструктивної географії, екологічної безпеки, збалансованого природокористування та післявоєнного просторового планування.

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.

Автори повністю дотримувалися етичних стандартів, включаючи питання плагиату, фальсифікації даних та дублювання публікацій.

Внесок авторів: Автори зробили рівний внесок у цю роботу.

Декларація про використання ШІ

У дослідженні використовували ChatGPT-5.1 (OpenAI, 2025) виключно для редагування мови та корекції граматики. Весь науковий контент, матеріали та висновки створені авторами. Остаточний текст переглянутий та перевірений авторами.

Список використаної літератури

1. Паспорт спеціальності 11.00.11 – конструктивна географія і раціональне використання природних ресурсів. Київ, б. р. 2 с. URL: <https://asp.knu.ua/doc/Pasport/11.00.00/11.00.11.pdf>
2. European Landscape Convention. Florence, 20.X.2000. Council of Europe. URL: <https://www.coe.int/en/web/landscape/the-european-landscape-convention> (дата звернення: 27.03.2026).
3. Sauer C. O. The Morphology of Landscape. *University of California Publications in Geography*. 1925. Vol. 2, No. 2. P. 19–53. URL: <https://www.scribd.com/doc/256866389/Sauer-1925-Morphology-of-Landscape>
4. Мірошніченко В. В., Некос А. Н. Культурний ландшафт: географічний та правовий аспекти. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2011. № 1–2. С. 69–73. URL: <http://luddovk.univer.kharkov.ua/sites/default/files/Papers/Mirishnih.pdf>
5. Мірошніченко В. В. Комфортність відеоєкологічного середовища урбогеосистеми міста Харків: відеоєкологічний аспект. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2012. № 1–2. С. 92–99. URL: <http://luddovk.univer.kharkov.ua/sites/default/files/Papers/15-12-17.pdf>
6. Swanwick C. Landscape Character Assessment: Guidance for England and Scotland. Cheltenham ; Edinburgh : The Countryside Agency ; Scottish Natural Heritage, 2002. 84 p. URL: <https://digital.nls.uk/pubs/e-monographs/2020/216649977.23.pdf>
7. Guidelines for Landscape and Visual Impact. Landscape Institute, Institute of Environmental Management and Assessment. 3rd ed. London ; New York : Routledge, 2013. 169 p. URL: https://www.torbay.gov.uk/media/15326/68-guidelinesforlandscapeandvisualimpactassessment_3rd-edition_2013.pdf

8. Lynch K. The Image of the City. Cambridge, MA : MIT Press, 1960. 194 p. URL: <https://cus.ubt-uni.net/wp-content/uploads/2024/11/Kevin-Lynch-The-Image-of-the-City.pdf>
9. Kaplan R., Kaplan S. The Experience of Nature: A Psychological Perspective. Cambridge : Cambridge University Press, 1989. 340 p. URL: [https://www.hse.ru/data/2019/03/04/1196348207/%5BRachel_Kaplan_Stephen_Kaplan%5D_The_Experience_of_\(b-ok.xyz\).pdf](https://www.hse.ru/data/2019/03/04/1196348207/%5BRachel_Kaplan_Stephen_Kaplan%5D_The_Experience_of_(b-ok.xyz).pdf)
10. Ulrich R. S. View through a window may influence recovery from surgery. *Science*. 1984. Vol. 224, No. 4647. P. 420–421. <https://doi.org/10.1126/science.6143402>
11. Hartig T., Mitchell R., de Vries S., Frumkin H. Nature and Health. *Annual Review of Public Health*. 2014. Vol. 35. P. 207–228. <https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-032013-182443>
12. Haase D., Larondelle N., Andersson E., Artmann M., Borgström S., Breuste J., Gomez-Baggethun E., Gren Å., Hamstead Z., Hansen R., Kabisch N., Kremer P., Langemeyer J., Rall E. L., McPhearson T., Pauleit S., Qureshi S., Schwarz N., Voigt A., Wurster D., Elmqvist T. A quantitative review of urban ecosystem service assessments: concepts, models, and implementation. *Ambio*. 2014. Vol. 43, No. 4. P. 413–433. <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0504-0>
13. Ahern J. From fail-safe to safe-to-fail: Sustainability and resilience in the new urban world. *Landscape and Urban Planning*. 2011. Vol. 100, No 4. P. 341–343. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.02.021>
14. Meerow S., Newell J. P., Stults M. Defining urban resilience: A review. *Landscape and Urban Planning*. 2016. Vol. 147. P. 38–49. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.11.011>
15. Operational Guidelines for the Implementation of the World Heritage Convention. UNESCO World Heritage Centre. Paris, 2023. URL: <https://whc.unesco.org/en/guidelines/> (дата звернення: 27.03.2026).
16. Damaged cultural sites in Ukraine verified by UNESCO. UNESCO. URL: <https://www.unesco.org/en/ukraine-war/damaged-cultural-sites> (дата звернення: 27.03.2026).
17. Due to russian aggression, 1,419 cultural heritage sites and 2,233 cultural infrastructure facilities damaged in Ukraine. Ministry of Culture and Strategic Communications of Ukraine. 2025. URL: <https://mincult.gov.ua/en/news/due-to-russian-aggression-1419-cultural-heritage-sites-and-2233-cultural-infrastructure-facilities-damaged-in-ukraine/> (дата звернення: 27.03.2026).
18. Updated Ukraine Recovery and Reconstruction Needs Assessment Released. World Bank. 2025. URL: <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2025/02/25/updated-ukraine-recovery-and-reconstruction-needs-assessment-released> (дата звернення: 27.03.2026).
19. Kharkiv Masterplan – Ukraine. Norman Foster Foundation. URL: <https://normanfosterfoundation.org/project/kharkiv-masterplan-housing-pilot-project-kharkiv-ukraine-2024-2025/> (дата звернення: 27.03.2026).
20. New European Bauhaus: Beautiful, Sustainable, Together. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. COM(2021) 573 final. Brussels, 2021. URL: https://new-european-bauhaus.europa.eu/system/files/2021-09/COM%282021%29_573_EN_ACT.pdf (дата звернення: 27.03.2026).
21. IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge : Cambridge University Press, 2022. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/> (дата звернення: 27.03.2026).
22. Sustainable rebuilding of Ukrainian cities. Eurocities Toolkit. 2024. URL: https://monitor.eurocities.eu/wp-content/uploads/2024/05/Eurocities_Toolkit_Ukraine_final.pdf (дата звернення: 27.03.2026).
23. Recommendations of the ICOMOS Europe Group on the damage and loss of cultural heritage in Ukraine. ICOMOS, 2022. URL: https://www.icomos.org/images/DOCUMENTS/Secretariat/2022/Ukraine/ICOMOS_Europe_Group_recommendations_Ukraine.pdf (дата звернення: 27.03.2026).
24. Action Plan for Culture in Ukraine. UNESCO, 2024. URL: <https://articles.unesco.org/sites/default/files/medias/fichiers/2024/09/UNESCO%20Action%20Plan%20Culture%20for%20Ukraine%20Recovery%202024.pdf> (дата звернення: 27.03.2026).
25. Oldham M. Urban landscapes and climate change: the contribution of Landscape Architects to improve the quality of life. Council of Europe, 2021. URL: https://www.iflaeurope.eu/assets/docs/CEP-CDCPP_%282021%29_7E_-_Report_Landscape_Architects.docx%28%29_.pdf (дата звернення: 27.03.2026).
26. UNDRR engages with Ukrainian cities at European Urban Resilience Forum. UNDRR, 2024. URL: <https://mcr2030.undrr.org/news/undrr-engages-ukrainian-cities-european-urban-resilience-forum> (дата звернення: 27.03.2026).
27. Supporting resilient cities and reconstruction in Ukraine. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), 2023. URL: <https://www.giz.de/en/projects/strengthening-urban-resilience-areas-supply-infrastructure-and-housing-ukraine> (дата звернення: 27.03.2026).
28. Destroying Cultural Heritage: Explosive Weapons' Effects in Armed Conflict and Measures to Improve Protection. Human Rights Watch, 2024. URL: <https://www.hrw.org/report/2024/04/18/destroying-cultural-heritage/explosive-weapons-effects-armed-conflict-and> (дата звернення: 27.03.2026).

Отримано: 04.04.2026 / Переглянуто: 05.05.2026 / Прийнято: 09.05.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

A. N. NEKOS, 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,
Svobody Sq,6, 61022, Kharkiv, Ukraine

V. V. MIROSHNYCHENKO
Deputy Director
e-mail: vmiroshnichenke@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6785-6351>
LLC "VDM-Ukraine",
Kashtanova Str., 16, Dnipro, 49051, Ukraine

TRANSFORMATION OF CULTURAL LANDSCAPES OF THE KHARKIV URBAN GEOSYSTEM UNDER WAR IMPACT: CONSTRUCTIVE-GEOGRAPHICAL APPROACHES TO ASSESSMENT AND RECOVERY

Purpose. To substantiate a constructive-geographical approach to assessing the transformation of cultural landscapes of the Kharkiv urban geosystem under war impact and to define directions for their preservation, optimization and integration into the system of post-war environmentally balanced urban recovery.

Methods. The study uses systemic, comparative-geographical, cartographic, geoinformation, typological and expert-assessment methods.

Results. Cultural landscapes are considered as components of the natural-economic territorial system of the city combining natural basis, anthropogenic development, territorial functions, historical memory, visual-landscape characteristics and safety parameters. It is shown that war impact caused not only physical damage to cultural objects and urban spaces, but also transformation of functions, symbolic meanings, visual integrity, recreational potential and perception of the urban environment. The category “visual-landscape comfort of the urban environment” is proposed as a broader methodological alternative to the narrow term “videoecology”. A system of criteria for assessing the current state of cultural landscapes is developed, including spatial, ecological, cultural, functional, war-transformation, visual-landscape and managerial blocks.

Conclusions. The cultural landscapes of Kharkiv should be considered as a resource of urban resilience, environmental safety, spatial continuity, local identity and post-war recovery. Their assessment should be integrated into GIS monitoring, green infrastructure, heritage protection programmes, memorialization and spatial planning.

KEY WORDS: *cultural landscape, urban geosystem, Kharkiv, environmental safety, visual-landscape comfort, post-war recovery*

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.

The authors fully adhered to ethical standards, including issues of plagiarism, data fabrication, and duplicate publication.

Author Contributions: The authors contributed equally to this work.

AI Statement

The study used ChatGPT-5.1 (OpenAI, 2025) exclusively for language editing and grammar correction. All scientific content, materials, and conclusions were created by the authors. The final text was reviewed and verified by the authors.

References

1. Specialty passport 11.00.11 – constructive geography and rational use of natural resources. (n.d.). Kyiv. Retrieved from <https://asp.knu.ua/doc/Pasport/11.00.00/11.00.11.pdf> (in Ukrainian)
2. Council of Europe. (2000). European Landscape Convention. Retrieved from <https://www.coe.int/en/web/landscape/the-european-landscape-convention>
3. Sauer, C. O. (1925). The morphology of landscape. University of California Publications in Geography, 2(2), 19–53. Retrieved from <https://www.scribd.com/doc/256866389/Sauer-1925-Morphology-of-Landscape>
4. Miroschnyenko, V. V., & Nekos, A. N. (2011). Cultural landscape: geographical and legal aspects. *Man and Environment. Issues of Neoeology*, (1–2), 69–73. Retrieved from <http://luddovk.univer.kharkov.ua/sites/default/files/Papers/Mirishnih.pdf> (in Ukrainian)

5. Miroschnychenko, V. V. (2012). Comfort of the video-ecological environment of the urban geosystem of Kharkiv city: video-ecological aspect. *Man and Environment. Issues of Neoeology*, (1–2), 92–99. Retrieved from <http://luddovk.univer.kharkov.ua/sites/default/files/Papers/15-12-17.pd> (in Ukrainian)
6. Swanwick, C. (2002). Landscape Character Assessment: Guidance for England and Scotland. The Countryside Agency; Scottish Natural Heritage. Retrieved from <https://digital.nls.uk/pubs/e-monographs/2020/216649977.23.pdf>
7. Guidelines for Landscape and Visual Impact Assessment (2013). (3rd ed.). Landscape Institute, & Institute of Environmental Management and Assessment. Routledge. Retrieved from <https://www.torbay.gov.uk/media/15326/68-guidelinesforlandscapeandvisualimpactassessment-3rd-edition-2013.pdf>
8. Lynch, K. (1960). *The Image of the City*. MIT Press. Retrieved from <https://cus.ubt-uni.net/wp-content/uploads/2024/11/Kevin-Lynch-The-Image-of-the-City.pdf>
9. Kaplan, R., & Kaplan, S. (1989). *The Experience of Nature: A Psychological Perspective*. Cambridge University Press. Retrieved from [https://www.hse.ru/data/2019/03/04/1196348207/%5BRachel_Kaplan_Stephen_Kaplan%5D_The_Experience_of_\(b-ok.xyz\).pdf](https://www.hse.ru/data/2019/03/04/1196348207/%5BRachel_Kaplan_Stephen_Kaplan%5D_The_Experience_of_(b-ok.xyz).pdf)
10. Ulrich, R. S. (1984). View through a window may influence recovery from surgery. *Science*, 224(4647), 420–421. <https://doi.org/10.1126/science.6143402>
11. Hartig, T., Mitchell, R., de Vries, S., & Frumkin, H. (2014). Nature and health. *Annual Review of Public Health*, 35, 207–228. <https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-032013-182443>
12. Haase, D., Larondelle, N., Andersson, E., et al. (2014). A quantitative review of urban ecosystem service assessments: concepts, models, and implementation. *Ambio*, 43(4), 413–433. <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0504-0>
13. Ahern, J. (2011). From fail-safe to safe-to-fail: Sustainability and resilience in the new urban world. *Landscape and Urban Planning*, 100(4), 341–343. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.02.021>
14. Meerow, S., Newell, J. P., & Stults, M. (2016). Defining urban resilience: A review. *Landscape and Urban Planning*, 147, 38–49. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.11.011>
15. UNESCO World Heritage Centre. (2023). Operational Guidelines for the Implementation of the World Heritage Convention. Retrieved from <https://whc.unesco.org/en/guidelines/>
16. UNESCO. (2026). Damaged cultural sites in Ukraine verified by UNESCO. Retrieved from <https://www.unesco.org/en/ukraine-war/damaged-cultural-sites>
17. Ministry of Culture and Strategic Communications of Ukraine. (2025). Due to russian aggression, 1,419 cultural heritage sites and 2,233 cultural infrastructure facilities damaged in Ukraine. Retrieved from <https://min-cult.gov.ua/en/news/du-to-russian-aggression-1419-cultural-heritage-sites-and-2233-cultural-infrastructure-facilities-damaged-in-ukraine/>
18. World Bank. (2025). Updated Ukraine Recovery and Reconstruction Needs Assessment Released. Retrieved from <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2025/02/25/updated-ukraine-recovery-and-reconstruction-needs-assessment-released>
19. Norman Foster Foundation. (2024–2025). Kharkiv Masterplan – Ukraine. Retrieved from <https://normanfosterfoundation.org/project/kharkiv-masterplan-housing-pilot-project-kharkiv-ukraine-2024-2025/>
20. European Commission. (2021). New European Bauhaus: Beautiful, Sustainable, Together. COM(2021) 573 final. Retrieved from https://new-european-bauhaus.europa.eu/system/files/2021-09/COM%282021%29_573_EN_ACT.pdf
21. IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
22. Eurocities. (2024). Sustainable rebuilding of Ukrainian cities: Toolkit. Retrieved from https://monitor.eurocities.eu/wp-content/uploads/2024/05/Eurocities_Toolkit_Ukraine_final.pdf
23. ICOMOS. (2022). Recommendations of the ICOMOS Europe Group on the damage and loss of cultural heritage in Ukraine. Retrieved from https://www.icomos.org/images/DOCUMENTS/Secretariat/2022/Ukraine/ICOMOS_Europe_Group_recommendations_Ukraine.pdf
24. UNESCO. (2024). Action Plan for Culture in Ukraine. Retrieved from <https://articles.unesco.org/sites/default/files/medias/fichiers/2024/09/UNESCO%20Action%20Plan%20Culture%20for%20Ukraine%20Recovery%202024.pdf>
25. Oldham, M. (2021). Urban landscapes and climate change: the contribution of Landscape Architects to improve the quality of life. Council of Europe. Retrieved from https://www.iflaeurope.eu/assets/docs/CEP-CDCPP_%282021%29_7E_-_Report_Landscape_Architects.docx%282%29_.pdf
26. UNDRR. (2024). UNDRR engages with Ukrainian cities at European Urban Resilience Forum. Retrieved from <https://mcr2030.undrr.org/news/undrr-engages-ukrainian-cities-european-urban-resilience-forum>
27. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). (2023). Supporting resilient cities and reconstruction in Ukraine. Retrieved from <https://www.giz.de/en/projects/strengthening-urban-resilience-areas-supply-infrastructure-and-housing-ukraine>
28. Human Rights Watch. (2024). Destroying Cultural Heritage: Explosive Weapons’ Effects in Armed Conflict and Measures to Improve Protection. Retrieved from <https://www.hrw.org/report/2024/04/18/destroying-cultural-heritage/explosive-weapons-effects-armed-conflict-and>

<https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-03>

УДК (UDC): 502.31

В. В. СЕРЕДЕНКО

старший викладач кафедри композитних конструкцій та авіаційного матеріалознавства
e-mail: seredenkovikt@gmail.com ORSID ID: <https://orcid.org/0009-0009-7282-8046>

Національний аерокосмічний університет «ХАІ»,
вул. Вадима Манько, 17, Харків, 61000, Україна

АНАЛІЗ СТАНУ ВОДНИХ РЕСУРСІВ ХАРКІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Мета. Аналіз стану водних ресурсів Харківської області, оцінка антропогенного впливу за сучасних умов.

Методи. Системний аналіз.

Результати. Харківська область характеризується низькою ємністю водних ресурсів. У регіоні водні ресурси формуються за рахунок надходження поверхневих вод із річки Сіверський Донець, місцевого річкового стоку, а також стічних, шахтних і кар'єрних вод. Аналіз показує поступове зменшення в останні роки споживання води з природних джерел, при цьому промисловість залишається основним споживачем. Визначено періодичні перевищення допустимих норм каламутності, кольору, загальної жорсткості та концентрації заліза, сульфатів, нітратів, аміаку, хлоридів та фтору. Наразі якість води залишається нестабільною через комбінований вплив промислових скидів та наслідків військових дій. Порівняльний аналіз даних моніторингу за останній рік виявив обережну тенденцію до оздоровлення поверхневих вод за показниками органічного забруднення (БСК₅) та мінералізації (сульфати, хлориди).

Висновки. Гідроекологічна ситуація в Харківській обумовлена запровадженням воєнного стану і кліматичними змінами. Визначено нагальну потребу в модернізованих системах забору та додаткових заходах очищення води.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ґрунтові води, поверхневі води, споживання, хімічні показники води

Як цитувати: Середенко В. В. Аналіз стану водних ресурсів Харківської області. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2026. Вип. 45. С. 31–42. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-03>

In cites: Seredenko, V. V. (2026). Analysis of the water resources state in Kharkiv region. *Man and Environment. Issues of Neoeology*, (45), 31–42. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-03>

Вступ

Забезпечення національної безпеки держави в умовах тривалої воєнної агресії нерозривно пов'язане з охороною водних ресурсів, які є критично важливим елементом життєзабезпечення. Харківська область, володіючи розгалуженою гідрографічною мережею на чолі з головною артерією регіону — річкою Сіверський Донець, відіграє стратегічну роль у водозабезпеченні не лише північно-східного, а й сусідніх регіонів України.

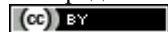
Проте антропогенний тиск на водні екосистеми Харківщини за останні роки зазнав докорінної трансформації. Якщо у довоєнний період основними чинниками деградації були промислові та побутові стічні води, то станом на 2024–2026 роки на перший план вийшли наслідки активних бойових дій: руйнація гідротехнічних споруд, пряме забруд-

нення продуктами детонації боєприпасів та витокami нафтопродуктів. Особливої гостроти набуває проблема стану нецентралізованих джерел водопостачання, де рівень забруднення нітратами та патогенами загрожує здоров'ю населення.

Харківська область є стратегічним джерелом прісної води для сусідніх регіонів, тому її екологічний стан впливає на національну водну безпеку.

Регіон володіє розгалуженою мережею водних артерій, що формують складну гідрографічну структуру. Загалом на Харківщині налічується 867 річок, які розподіляються за масштабом на великі річки, середні водотоки і малі річки. До великої ріки відноситься Сіверський Донець, загальна довжина якого сягає 1053 км, а межами області пролягає 375 км

© Середенко В. В., 2026



[This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

його русла. До середніх водотоків відносяться шість річок: Оскіл, Уди, Лопань, Мерла, Оріль та Самара. Решта водних об'єктів є малими річками. Попри незначні розміри, вони є стратегічно важливими для локального водозабезпечення.

Інтенсивне використання водних ресурсів промисловим сектором створює низку критичних викликів. Надмірне водоспоживання призводить до поступового вичерпання природних запасів прісної води. Брак води негативно позначається на сільськогосподарському виробництві, що спричиняє дефіцит продовольства [1].

Стан водних екосистем Харківської області за останні шість років зазнав кардинальних змін: від помірного антропогенного навантаження у довоєнний період до глибокої екологічної кризи, спричиненої бойовими діями та руйнацією інфраструктури.

До початку повномасштабного вторгнення основна увага науковців була зосереджена на гідрохімічному моніторингу Сіверського Дінця та проблемах малих річок.

Основними проблемами якості води були антропогенне навантаження і сезонність. Промислові та побутові стоки систематично забруднюють водойми амонієм, нітритами, хлоридами та органікою (БСК₅). Взимку рівень кисню дещо зростає, проте концентрація сульфатів і хлоридів залишається високою [2].

З початком повномасштабного вторгнення водні об'єкти регіону стали зоною екологічного лиха. Період активних бойових дій спричинив катастрофічне погіршення якості поверхневих вод. Руйнування Печенізької та Оскільської гребель призвело до розбалансування гідрологічного режиму [3]. Крім того, зафіксовано специфічне забруднення, нехарактерне для мирного часу. В воду потрапляють

залишки ракетного палива та вибухових речовин. Після ударів по нафтобазах (зокрема у 2024 році) концентрація нафтопродуктів у річках Нemişля та Лопань перевищувала норми у десятки разів [4].

В роботі [5] проаналізовано вплив бойових дій та руйнування промислових і інфраструктурних об'єктів на погіршення якості води, зокрема в Харківській області.

Періодично проводиться оцінювання якості води з різних джерел міста Харкова [6, 7], де визначається клас якості і надані рекомендації для покращення властивостей води.

Станом на першу половину 2026 року ситуація залишається напруженою, особливо у сфері нецентралізованого водопостачання. За даними Харківського обласного центру контролю та профілактики хвороб (квітень 2026):

- 40,2% проб води з колодязів та природних джерел не відповідають санітарно-хімічним нормам;
- спостерігається критичне перевищення вмісту нітратів, заліза та загальної жорсткості;
- у популярних джерелах Харкова (Саржин яр, Петренки) зафіксовано мікробіологічне забруднення, що пов'язано зі зміною рівнів ґрунтових вод та пошкодженням каналізаційних мереж [8].

Подальший аналіз водних ресурсів залишається актуальним. Якість і склад води в річках і інших водоймах постійно змінюється під впливом кліматичних умов і діяльності людей. Це особливо помітно в умовах воєнного стану і додатковим навантаженням на гідросферу, яка є важливим елементом навколишнього середовища.

Метою роботи є аналіз стану водних ресурсів Харківської області, оцінка антропогенного впливу за сучасних умов.

Методи дослідження

При аналізі стану водних ресурсів використано методи системного аналізу оприлюднених даних показників якості водних ресурсів [1–18], в тому числі підземних і поверхневих вод та питної води, враховуючи дані Доповіді про стан природного

середовища та Аналітичні довідки щодо екологічного стану м. Харкова та Харківської області.

Оцінка базується на ключових критеріях якості води, включаючи солоність (електропровідність), кислотність (рН), основні іони, нітрати, мікробіологічні забруднювачі.

Результати дослідження та обговорення

Існує безліч важливих зв'язків між сушею, прісною водою і океанами. Забруднення на суші оказують істотний вплив на водні екосистеми. Корисно це враховувати для

до цілісного управління природними ресурсами та економічного розвитку.

Одним з компонентів гідросфери є підземні води, якість яких є дуже важливою.

Підземні води мають свій унікальний хімічний склад. Якщо, наприклад, вони багаті на залізо, марганець чи сірководень, то при виході на поверхню ці елементи можуть накопичуватись у водоймах і змінювати їхній природний баланс.

Основними джерелами забруднення ґрунтових вод є сільське господарство, промисловість, побутові джерела. Добрива (нітрати, фосфати) проникають у ґрунт і з часом досягають рівня ґрунтових вод. Пестициди та гербіциди – це хімічні речовини, які застосовуються для захисту рослин, але потрапляють у воду через дощ і полив. Якщо підземні води містять надмірну кількість поживних речовин (зокрема, фосфору та азоту з добрив), це може викликати евтрофікацію, тобто надмірне зростання водоростей у річках і озерах. Це, своєю чергою, є причиною зниження кількості кисню у воді та загибелі водних організмів. Гній і стічні води тваринницьких ферм також містять патогени, органічні речовини та азот [9].

Забруднення підземних вод промисловими речовинами, стічними водами або продуктами нафтової діяльності також може призводити до токсичних наслідків для екосистем річок і озер, особливо якщо ці речовини важко розкладаються.

Підземні води є джерелом живлення для річок і озер, особливо в посушливі періоди. Якщо ці води забруднені (наприклад, нітратами, пестицидами, важкими металами або нафтовими продуктами), то вони можуть переносити ці забруднення в поверхневі води, погіршуючи їх якість.

Іноді підземні води мають підвищену температуру (наприклад, геотермальні джерела). Вони можуть впливати на температурний режим водойм, змінюючи умови для життя водних організмів.

Погіршення якості підземних вод напряму загрожує чистоті та екологічному стану річок і озер. Оскільки вода постійно циркулює в природі, охорона підземних вод є ключовою складовою збереження всього водного середовища.

Звалища небезпечних відходів при витіканні токсичних речовин (ртуть, свинець, кадмій) у землю, нафтопродукти і хімічні виtokи з заводів, автозаправок, нафтобаз та недостатньо очищені промислові стоки також значно погіршують якість ґрунтових вод. Забруднення ґрунтових вод – це наслідок діяльності людини, перш за все це несвідоме або безконтрольне поводження з хімікатами, відходами та водними ресурсами. Це забруд-

нення дуже складно усунути, бо підземна вода очищується природним шляхом дуже повільно [10].

У Харківській області водні ресурси формуються за рахунок надходження поверхневих вод із річки Сіверський Донець, місцевого річкового стоку, а також стічних, шахтних і кар'єрних вод. Додатково використовуються запаси підземних вод, атмосферні опади та води, що надходять із сусідніх регіонів. Область характеризується дуже низьким рівнем забезпеченості водними ресурсами. Це лише 1,8 % від загального обсягу водних ресурсів України.

Основні показники використання і відведення води по роках за даними Харківської обласної адміністрації показано в табл. 1 [11]. Дані свідчать про поступове зниження забору води з природних джерел, споживання свіжої води і загального водовідведення. Наприклад у 2010 році спожито 287,0 млн м³ води, а в 2023 – тільки 119,2 млн м³. При цьому різке зниження відбулось після початку повномасштабного вторгнення РФ. Потужність очисних споруд також знижується.

Найбільшим споживачем води в регіоні є промисловість. Ми бачимо зростання споживання з 2000 по 2020 рік. Потім стрімке падіння більш ніж в чотири рази, яке обумовлено початком бойових дій і втратою промислових потужностей. Разом з тим знижується побутово-питні потреби в наслідок великої кількості мешканців, які залишили свої домівки. У 2023 році спостерігається незначне збільшення споживання усіма споживачами. Це можна пояснити відновленням роботи деяких підприємств, повертанням додому мешканців міста і великої кількістю переселенців. Можна припустити, що в 2025 році буде спостерігатися дуже незначне збільшення використання води, так як в 2023 році показники незначно, але все ж таки більше, ніж у 2022 році.

У Харківському регіоні державний моніторинг підземних вод встановив, що вони відносяться до II класу хімічного стану, тобто «недосягнення доброго» [11, 12]. Це категорія, яка присвоюється водному об'єкту, якщо хоча б один із показників хімічного складу перевищує встановлені нормативи екологічної безпеки:

- у воді виявлено концентрації забруднюючих речовин (нітратів, важких металів, нафтопродуктів тощо), які вищі за норму для «доброго» стану. За результатами досліджень проб води поверхневих вод Харкова і

Таблиця 1

Показники використання і відведення води, млн м³

Table 1

Indicators of Water Use and Discharge, million m³

Показники Indicators	Роки Years					
	2000	2010	2015	2020	2022	2023
Забір води з природних водних джерел – всього /Water abstraction from natural water sources – total	403,0	337,0	292,8	310,1	144,9	139,5
для використання for use	401,0	335,0	289,0	291,4	115,2	119,2
Споживання свіжої води, з неї на: /Freshwater consumption, including:	408,0	287,0	247,0	291,4	115,2	119,2
виробничі потреби / industrial needs	105,0	104,0	118,1	171,7	40,2	43,7
побутово-питні потреби / domestic and drinking needs	251,0	143,0	122,7	112,4	72,4	72,6
Зрошення / irrigation	9,0	3,0	3,1	5,1	1,5	1,5
сільськогосподарські потреби / agricultural needs	21,0	5,0	2,9	2,2	1,1	1,4
Водовідведення, з нього: /Water discharge, including:	358,0	303,0	292,1	312,2	130,8	158,4
у поверхневі водні об'єкти / into surface water bodies	345,0	298,0	288,4	308,8	129,1	156,5
Потужність очисних споруд /Capacity of treatment facilities	641,0	512,0	503,5	483,2	467,6	468,2

області встановлено перевищення гранично допустимих концентрацій по рибогосподарським нормативам (по амоній-іону в 1-6,0 ГДК, по нітрит-іонам в 1-4,0 ГДК, по БСК₅ в 1-1,4 ГДК, по нафтопродуктам в 1-6,5 ГДК).

– стан води погіршився не через природні фактори, а внаслідок діяльності людини (сільське господарство, промислові викиди, пошкодження інфраструктури через бойові дії).

Така вода потребує обов'язкової додаткової очистки перед використанням як питної. Вживання води II класу в «сирому» вигляді може бути небезпечним для здоров'я. Держава зобов'язана розробити план заходів для відновлення водного об'єкта, щоб повернути його до I класу.

За результатами досліджень [11], у межах регіону не було виявлено перевищень екологічних норм якості води за пріоритетними забруднювальними речовинами та специфічними показниками для басейну (зокрема пестицидами, алкілфенолами, поліароматичними та галогенованими вуглеводнями). У більшості випадків рівень цих

речовин був настільки низьким, що їх важко було виявити.

Разом з тим, зафіксовано стабільне перевищення допустимих концентрацій специфічних речовин басейну (по марганцю 1,65 ГДК та цинку 1,1 ГДК) відповідно до рибогосподарських норм. Це перевищення має сталість і вкладається у рамки багаторічних показників.

Кліматичні умови значною мірою впливають на хімічний склад води, зокрема через обсяг водного стоку. У 2023 – 2025 роках весняна повінь на більшості річок басейну Сіверського Дінця була значно слабшою за середньобаторічні значення. Загальна водність басейну становила лише 55–85% від норми.

Починаючи з середини XX століття, в Україні не траплялося такого масштабного спуску водосховища, як це сталося у квітні 2022 року на річці Оскіл. Екологи визнали цю подію однією з найзначніших екологічних змін, що відбулися під час війни. За даними «Української природоохоронної групи», з водосховища раптово вийшло

близько 355 мільйонів кубічних метрів води, внаслідок чого оголилося майже 9 тисяч гектарів замуленого дна, колишніх заплавлених луків Осколу [14].

Водночас, за підсумками моніторингу поверхневих вод у 2023 і 2024 роках в районі забору питної води КП «Харківводоканал» з річки Сіверський Донець, концентрації фізичних і хімічних показників і вміст катіонів металів відповідали гігієнічним вимогам до якості води для питного, господарсько-побутового та іншого використання населенням [4, 11].

Згідно з результатами досліджень зразків питної води з джерел та систем централізованого водопостачання, **проведених у 2024 та 2025 роках** [4, 8, 11, 15], у зразках періодично фіксувалися перевищення допустимих нормативів за такими показниками, як каламутність (2,5 мг/дм³), кольоровість (25 градусів), загальна жорсткість (10,5 ммоль/дм³), концентрація заліза, сульфатів, нітратів, аміаку, хлоридів (280-350 мг/дм³), фтору та сухого залишку (1100-1200 мг/дм³). Із загальної кількості проб 3,3% не відповідали встановленим гігієнічним нормативам. Найбільша кількість відхилень зафіксована в Ізюмському, Куп'янському, Лозівському та Харківському районах. У досліджених зразках виявлено перевищення допустимих значень за такими показниками, як каламутність, колір, загальна жорсткість, а також концентрації заліза, сульфатів, нітратів і хлоридів [8, 15].

З метою оцінки масштабів та наслідків забруднення водних ресурсів Харківської області внаслідок воєнних дій, з жовтня 2022 року здійснюється моніторинг масивів поверхневих вод. Спостереження проводяться на річках Сіверський Донець, Великий Бурлук, Уди, Лопань, Харків, Липець, Мож та Оскіл у тих місцях, де це дозволяє поточна воєнна ситуація [11-14].

Досліджено середньорічні концентрації органічних та біогенних сполук, а саме ХСК, БСК₅, нітроген загальний, фосфор загальний і сухий залишок. За результатами досліджень проб води поверхневих вод Харкова і області встановлено перевищення гранично допустимих концентрацій по рибогосподарським нормативам, а саме: по амоній-іону (1-6,0 ГДК), по нітрит-іонам (1-4,0 ГД), по БСК₅ (1-1,4 ГДК), по нафтопродуктам (1-6,5 ГДК).

9 лютого 2024 року в результаті обстрілу нафтобази, розташованої в Немишлянському районі Харкова, стався витік нафтопродуктів, що спричинило забруднення річок Харків та Лопань. Після інциденту в річки м. Харкова та Харківської області потрапили 85,863 т забруднюючих речовин. У воді р. Немишля **зафіксовано перевищення допустимих рівнів нафтопродуктів** [4], що свідчить про забруднення поверхневих вод. Хоча аналіз підземних джерел водопостачання не виявив перевищення гранично допустимих концентрацій нафтопродуктів, існує ризик, що з часом забруднені ґрунти можуть стати джерелом проникнення цих речовин у підземні водоносні горизонти.

Постійне бомбардування регіону різними видами озброєння сильно погіршує стан екосистем. Велика кількість додаткового забруднення потрапляє в повітря і в водні ресурси Харківщини. Було зафіксовано перевищення середніх показників за багато років по з'єднанням азоту та нафтопродуктах. Це, в першу чергу, пов'язано з бойовими діями в регіоні [16-18]. Наприклад: в Печеніжському водосховищі фіксується перевищення вмісту фосфатів (0,55 мг/л) і нітратів (1,6 мг/л), а також перевищення в 15 разів значення ГДК по БСК₅ (2,8 мг О₂/л) і величині сухого залишку (500 ГДК) [3]. Це свідчить про забруднення води внаслідок руйнування греблі водосховища і внаслідок воєнної активності поруч.

За даними Харківського обласного центру з гідрометеорології проаналізовано зміну хімічних параметрів якості водних ресурсів Харківщини в березні 2025 і в березні 2026 років [13, 14]. Аналіз проводився по 17 контрольним точкам, що охоплюють основні річкові системи Харківщини (табл.2).

Більшість точок забору розташовані або в гирлових частинах (місця впадіння однієї річки в іншу), де акумулюється загальний рівень забруднення всієї річки, або в межах та околицях великих населених пунктів (Харків, Богодухів, Мерефа, Берестин, Золочів), що дозволяє оцінити прямий антропогенний вплив міст на екологічний стан води. Дослідження проводяться кожного місяця. Для аналізу було взяті дані за березень 2025 та березень 2026 рр., що дозволило відстежити динаміку водних об'єктів в умовах техногенного навантаження. Оцінка проводилася відповідно до жорстких нормативів ри=

Таблиця 2

Показники якості вод Харківської області

Table 2

Water quality indicators of the Kharkiv region

№	Назва водного об'єкту Name of water body	Результати вимірювань, мг/дм ³ Measurement results, mg/dm ³						
		Розчинений кисень Dissolved oxygen	БСК ₅ BOD ₅	Нітроген амонійний Ammonium nitrogen	Нітроген нітритний Nitrite nitrogen	Хлориди Chlorides	Сульфати Sulfates	
Нормативні показники якості вод рибогосподарського призначення /Standard indicators of quality of waters for fishery purposes		6	2	0,39	40	300	100	
1	р. Мерефа, м. Мерефа /River Merefа, Merefа	03.2025	14,4	3,93	0,411	0,020	59,7	207
		03.2026	12,5	2,89	0,637	0,033	27,9	87,5
2	р. Берестова, м. Берестин /River Berestova, Berestyn	03.2025	13,6	4,54	0,411	0,006	56,9	623
		03.2026	11,1	2,91	0,409	0,015	8,6	60,9
3	Орільське водосховище /Orilsk reservoir	03.2025	12,4	6,01	0,747	0,027	256	1900
		03.2026	12,5	4,31	0,175	0,012	32,9	47,5
4	р. Сіверський Донець, с. Задонецьке /River Siverskyi Donets, Zadonetske village	03.2025	11,4	5,75	0,473	0,055	72,3	232
		03.2026	10,2	1,78	0,433	0,061	60,0	207
5	р. Харків, гирло м. Харків /River Kharkiv, mouth of Kharkiv	03.2025	14,7	6,04	0,432	0,024	94,8	332
		03.2026	11,3	3,72	0,329	0,039	57,2	215
6	р. Немишля, гирло м. Харків /River Nemyshlya, mouth of Kharkiv	03.2025	15,0	7,94	0,404	0,019	89,8	255
		03.2026	12,2	2,05	0,348	0,043	93,6	209
7	р. Лопань, гирло м. Харків /River Lopan, mouth of Kharkiv	03.2025	12,6	9,62	2,416	0,106	117	278
		03.2026	11,3	1,48	0,130	0,083	92,9	194
8	р. Мож, гирло м. Зміїв /River Mozh, mouth of Zmiiv	03.2025	14,5	5,15	0,363	0,007	54,0	273
		03.2026	4,25	1,49	0,467	0,099	49,3	122
9	р. Уди, вище м.Харкова /River Udy, above Kharkiv	03.2025	14,1	8,71	1,332	0,009	31,6	210
		03.2026	12,5	2,50	0,433	0,058	27,9	118
10	р. Мерла, 1 км вище м. Богодухів /River Merla, 1 km above Bogoduhiv	03.2025	12,0	2,17	0,699	0,007	28,1	151
		03.2026	11,3	2,31	0,077	0,072	16,4	57,1

Продовження таблиці 2 Table continuation 2							
11	р. Мерла, 1 км нижче м. Богодухів /River Merla, 1 km below Bogoduhiv 03.2025 03.2026	12,7 11,3	1,29 1,94	1,230 0,125	0,011 0,081	28,8 15,7	162 51,4
12	р. Сіверський Донець Печенізьке вдсх, с. Печеніги /River Siverskyi Donets Pechenizke regional agricultural district, Pechenyhi village 03.2025 03.2026	13,3 10,8	3,45 0,68	0,767 0,321	0,016 0,066	46,3 44,3	164 177
13	р. Леб'яжа, гирло, с. Леб'яже /River Lebyazha, mouth, Lebyazhe village 03.2025 03.2026	12,7 11,9	1,95 1,21	1,274 0,321	0,024 0,030	23,2 21,4	682 601
14	р. Уди, с.Золочів /River Udy, Zolochiv village 03.2025 03.2026	13,0 10,5	6,33 1,51	0,315 0,433	0,011 0,058	97,6 36,4	341 118
15	р. Сіверський Донець, нижче гирла р. Уди, с. Есхар /River Siverskyi Donets, below the mouth of the Udy river, Eschar 03.2025 03.2026	13,0 9,91	6,72 1,26	0,712 0,645	0,107 0,045	76,5 41,5	214 219
16	р. Уди, гирло, с. Есхар /Udy River, mouth, village Eschar 03.2025 03.2026	12,6 9,34	9,08 1,84	2,028 0,932	0,347 0,107	117 77,2	299 215
17	р. Муром, гирло /Murom River, mouth 03.2025 03.2026	12,1 11,3	4,56 1,79	0,343 0,367	0,011 0,030	54,0 68,6	240 205

богосподарського призначення, де гранично допустимі концентрації (ГДК) є значно нижчими, ніж для питних або технічних потреб, що дозволяє виявити навіть незначні негативні тенденції в екосистемі. Визначались кількості розчиненого кисню, БСК₅ (біохімічне споживання кисню за 5 діб), нітрогену амонійного (амоній-нітроген), нітрогену нітритного (нітрит-нітроген), хлоридів та сульфатів.

Кисневий режим є фундаментальним індикатором здоров'я водойми. Розчинений кисень є критичним параметром, що визначає можливість існування вищих гідробіонтів, зокрема риб. Якщо цей показник нижче норми починається гіпоксія (задуха) гідробіонтів. Риба стає млявою, втрачає здатність до розмноження, а при критичних значеннях (менше 2 мг/дм³) настає масовий замор. Також зупиняються процеси самоочищення і

вода починає гнити, виділяючи сірководень. Якщо показник значно вище норми це часто свідчить про «цвітіння» води (надлишок водоростей), що вдень продукують кисень, а вночі його різко поглинають, викликаючи нічні замори.

У березні 2025 року спостерігалися надвисокі концентрації розчиненого кисню (до 15,0 мг/дм³ у р. Немишля та 14,7 мг/дм³ у р. Харків), що пояснюється низькою температурою води та інтенсивним насиченням під час весняного паводку. Однак порівняльний аналіз 2026 року виявив тривожну деградацію цього показника в окремих локаціях. Найбільш критична ситуація зафіксована на р. Мож (м. Зміїв), де рівень кисню знизився з 14,5 до 4,25 мг/дм³. Оскільки норматив становить не менше 6 мг/дм³, такий спад свідчить про наявність потужного джерела органічного забруднення або застійні

явища, що спричиняють активне споживання кисню на процеси окиснення. Дефіцит кисню гальмує процеси природного самоочищення води, оскільки аеробні бактерії не можуть ефективно окислювати органічні забруднення. Це створює загрозу виникнення замору риби та накопичення токсичних продуктів розпаду (сірководню, метану) у придонних шарах води. Подібна тенденція, хоч і в менших масштабах, характерна для більшості об'єктів (наприклад, для р. Берестова спостерігається зниження з 13,6 до 11,1 мг/дм³), що вимагає пильного контролю за станом іхтіофауни.

Одним із найважливіших досягнень звітної періоду є радикальне зниження біохімічного споживання кисню (БСК₅). Показник БСК₅ відображає кількість кисню, необхідну для мікробіологічного розкладу органіки. Перевищення цього показника свідчить про надлишок легкорозкладної органіки (стічні води). Мікроорганізми, що її переробляють, поглинають весь вільний кисень, перетворюючи водойму на «мертву зону». Чим вище БСК₅, тим сильніше бактеріальне забруднення води. Значення БСК₅ нижче норми свідчить про чистоту води та відсутність свіжих органічних викидів.

У 2025 році стан річок у межах міста Харкова був близьким до екологічної катастрофи: р. Лопань продемонструвала 9,62 мг/дм³, а р. Уди – до 9,08 мг/дм³, що перевищувало норму майже у 5 разів. Такі перевищення свідчили про інтенсивне надходження господарсько-побутових та промислових стічних вод. Станом на березень 2026 року спостерігається разючий прогрес: рівень органіки в р. Лопань знизився до 1,48 мг/дм³, р. Харків – до 3,72 мг/дм³, а в р. Уди (Золочів) – до 1,51 мг/дм³. Така позитивна динаміка може бути результатом зменшення обсягів скидів або покращення роботи очисних споруд міських комунальних підприємств. Дані 2026 року фіксують неочікувано позитивні зміни, які можуть свідчити про суттєву модернізацію очисних споруд, припинення діяльності окремих промислових підприємств або посилення екологічного нагляду. Водночас, Орільське водосховище також продемонструвало покращення з 6,01 до 4,31 мг/дм³, хоча все ще залишається за межами норми (2,0 мг/дм³).

Ситуація з біогенними елементами залишається найбільш стабільною та водночас

проблемною частиною моніторингу. Вміст сполук азоту є маркером фекального та промислового забруднення. Амоній є токсичним для риб, він порушує їхнє дихання та пошкоджує зябра. При підвищенні рН води амоній перетворюється на вкрай отруйний аміак. Для людини така вода непридатна, оскільки вказує на небезпечне бактеріальне середовище. Зниження кількості амонійного нітрогену свідчить про завершення процесів мінералізації та чистоту водного об'єкту.

Амонійний нітроген у 2025 році демонстрував критичні перевищення в р. Лопань (2,416 мг/дм³) та р. Уди (2,028 мг/дм³), що в 5-6 разів вище за ГДК (0,39 мг/дм³). В 2026 році для амонійного нітрогену спостерігається загальне зниження концентрацій, проте вони залишаються вищими за ГДК. Особливу увагу привертає р. Мережа, де зафіксовано зростання показника з 0,411 до 0,637 мг/дм³. У той же час р. Мерла нижче м. Богодухів показала зразкове зниження з 1,230 до 0,125 мг/дм³, що підтверджує ефективність локальних очисних заходів.

Нітрити є найбільш токсичними сполуками азотистої групи. У 2026 році на багатьох об'єктах зафіксовано ріст концентрацій (наприклад, р. Мож – 0,099 мг/дм³). При перевищенні норми нітрити діють як сильна отрута, викликаючи у риб метгемоглобінемію (кров втрачає здатність переносити кисень). Навіть незначне перевищення призводить до хронічних хвороб іхтіофауни та зниження імунітету водних організмів. Якщо показник нижче норми це вказує на стабільний екологічний стан та ефективну роботу природних фільтрів.

Кількість нітритного нітрогену є індикатором проміжних стадій розкладу азотистих сполук. На відміну від амонію, концентрація нітритів у 2026 році зросла на багатьох об'єктах. У р. Харків (гирло) вона піднялася з 0,024 до 0,039 мг/дм³, а в р. Мож – з 0,007 до 0,099 мг/дм³. Це вказує на те, що хоча прямі скиди органіки (БСК₅) зменшилися, процеси окиснення азоту в річковій воді все ще відбуваються інтенсивно, що створює токсичне навантаження на екосистему.

Кількість сульфатів та хлоридів (нормативні концентрації 100 мг/дм³ та 300 мг/дм³ відповідно) визначають мінералізацію води. Якщо концентрація сульфати вище норми вода набуває гіркого смаку, може викликати розлади травлення у людей

та тварин. Високі концентрації сульфатів прискорюють корозію металевих конструкцій та негативно впливають на розвиток ікри риби. Перевищення нормативних значень для хлоридів приводить до підвищення солоності води та є агресивним для довкілля. Надлишок хлоридів ускладнює фотосинтез водних рослин і робить воду непридатною для зрошення та промислового використання без дорогої очистки.

Показники мінералізації (хлориди та сульфати) продемонстрували найбільшу амплітуду змін. Орільське водосховище у 2025 році було зоною екстремального хімічного навантаження: вміст сульфатів сягав 1900 мг/дм³, а хлоридів – 256 мг/дм³. Це було результатом багаторічного накопичення мінералізованих вод. У 2026 році показники повернулися до фонових значень (сульфати – 47,57 мг/дм³, хлориди – 32,9 мг/дм³). Схожа,

хоч і менш виражена тенденція, спостерігається на р. Берестова (зниження сульфатів з 623 до 87,5 мг/дм³). Це свідчить про інтенсивне промивання русел та припинення надходження високомінералізованих шахтних або технічних вод.

За даними досліджень можна стверджувати, що поверхневі води Харківщини знаходяться на етапі активного відновлення. Найбільш забрудненими точками залишаються гирла річок Уди та Лопань, що зумовлено високою концентрацією населення та промисловості. Проте динаміка 2026 року дає підстави для стриманого оптимізму. Ключовим викликом на наступний період стає вирішення проблеми високого вмісту сполук азоту та розслідування причин різкого падіння рівня розчиненого кисню в р. Мож, що може стати перешкодою для відновлення біорізноманіття в регіоні.

Висновки

Аналіз екологічного стану водних ресурсів Харківської області у період 2022–2026 років визначив, що поряд із традиційним промисловим забрудненням, ключовим фактором деградації водних екосистем стали наслідки бойових дій. Руйнація інфраструктури (гребель, очисних споруд, нафтобаз) призвела до різких стрибків концентрації нафтопродуктів, важких металів та специфічних токсикантів у річках Немишля, Лопань та Уди.

Ситуація з децентралізованим водопостачанням станом на квітень 2026 року залишається критичною: понад 40% проб із колодязів та каптажів не відповідають санітарним нормам. Основними проблемами є високий вміст нітратів, заліза та мікробіологічне забруднення, що зумовлено пошкодженням каналізаційних мереж та зміною рівнів ґрунтових вод.

Порівняльний аналіз даних моніторингу за останній рік виявив обережну тенденцію до оздоровлення поверхневих вод за показниками органічного забруднення (БСК₅) та

мінералізації (сульфати, хлориди). Це може бути наслідком як часткового відновлення роботи очисних споруд, так і загального зниження промислового навантаження. Водночас тривожним залишається стан р. Мож, де зафіксовано критичне падіння рівня розчиненого кисню, та стабільне перевищення норм нітритного азоту в інших водоймах.

Масштабний спуск Оскільського водосховища та зниження водності басейну Сіверського Дінця до 55–85% від норми суттєво послабили самоочисну здатність річок, що робить екосистеми вкрай вразливими до будь-яких нових забруднень.

Подальше управління водними ресурсами регіону потребує впровадження систем інтегрованого моніторингу, що враховує взаємозв'язок підземних та поверхневих вод, а також невідкладних заходів із рекультивації територій, забруднених нафтопродуктами, для запобігання їх потраплянню у глибокі водоносні горизонти.

Конфлікт інтересів

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

Декларація про використання ШІ

У цьому дослідженні не використовувався генеративний штучний інтелект.

Список використаних джерел

1. Сніжко С., Шевченко О., Дідовець Ю. Аналіз впливу кліматичних змін на водні ресурси України (повний звіт за результатами проекту). Центр екологічних ініціатив «Екодія». 2021. 68 с. URL: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2021/06/analiz-vplyvu-vodni-resursy-full.pdf>
2. 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. С. 83 - 99. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2024-41-06>
3. Борисенко, К., Хатчінсон, С. М., Сінчук Д. Прояви та наслідки водних конфліктів: на прикладі Печенізького водосховища, Харківська область Україна. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*, 2024. Вип. 60. С. 173-187. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-12>
4. Екологічний паспорт Харківської області за 2024 рік. URL: <https://kharkivoda.gov.ua/oblasna-derzhavna-administratsiya/struktura-administratsiyi/strukturni-pidrozdili/486/2736/132692> (дата звернення 18.03.2026)
5. Аналіз якості води у водних об'єктах Харківської області. Колективна монографія "Реалії та стратегії розвитку України: вітчизняний та закордонний досвід" Реалії та стратегії розвитку України: вітчизняний та закордонний досвід: кол. Моногр. СГ НТМ «Новий курс». 2024. С. 82-94. URL: <https://www.researchgate.net/publication/385416742> (дата звернення 18.03.2026)
6. Лісняк А. А., Кулик М. І. Оцінка якості вод з різних джерел водопостачання у Київському районі м. Харкова. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна серія «Екологія»*. 2024. № 30. С. 36-48. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2024-30-03>
7. Лісняк А. А., Кулик М. І., Тогма С. Якість питної води з різних джерел у Шевченківському районі міста Харкова. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2025. № 44. С. 35-46. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2025-44-03>
8. Результати лабораторних досліджень води з джерел нецентралізованого водопостачання на території Харківської області за 3 місяці 2026 року/ URL: <https://kh.cdc.gov.ua/news/rezultaty-laboratoryhdoslidzhen-vody-z-dzherel-netsentralizovanogo-vodopostachannya-na-terytoriyi-harkivskoyi-oblasti-za-3-misyatsi-2026-roku/>
9. Василенко Л., Березницька Ю., Кравченко М., Шевченко О., Цьома Т. Забруднення поверхневих вод фосфатами та важкими металами *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки*. 2022. Вип.38. С. 4-17. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2022.38.4-17>
10. Кірейцева Г., Циганенко-Дзюбенко І., Замула І., Демчук Л. Аналіз стану та моніторинг поверхневих водних об'єктів Чернігівської області. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2024. Випуск 1(144). С. 84-91. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.1.11>
11. Доповідь «Про стан навколишнього природного середовища в Харківській області У 2023 році». URL: https://kharkivoda.gov.ua/content/documents/1285/128411/Attaches/regionalna_dopovid_2023_harkiv.pdf (дата звернення 18.03.2026)
12. Програма Економічного і соціального розвитку Харківської області на 2024 рік. URL: <https://oblrada-kharkiv.gov.ua/program/programa-ekonomichnogo-i-soczialnogo-rozvytku-harkivskoyi-oblasti-na-2024-rik/> (дата звернення 18.03.2026)
13. Аналітична довідка щодо екологічного стану м. Харкова та Харківської області за березень 2025 року. URL: <https://kharkivoda.gov.ua/oblasna-derzhavna-administratsiya/struktura-administratsiyi/strukturni-pidrozdili/486/2736/131109> (дата звернення 18.03.2026)
14. Аналітична довідка щодо екологічного стану м. Харкова та Харківської області за березень 2026 року. URL: https://kharkivoda.gov.ua/content/documents/1354/135322/Attaches/dovidka_monitoring_za_berezen_2026.pdf
15. Результати лабораторних досліджень води з джерел централізованого водопостачання на території Харківської області за 2024 рік. URL: <https://kh.cdc.gov.ua/news/6721/>
16. Тертицький Є. П. Екологічна інфраструктура та її роль у сталому розвитку міст: аналіз і перспективи. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2024. Вип. 30. С. 63 – 75. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2024-30->
17. Кравченко О., Василюк О., Войціховська А., Норенко К. Дослідження впливу військових дій на довкілля на Сході України. *Схід*. 2015. № 2. С. 118–123. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Skhid_2015_2_23
18. Величко С., Дупляк О. Вплив повномасштабної агресії на водні об'єкти як джерела водопостачання. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки. Водні біоресурси та аквакультура*. 2023. № 45. С. 5–14. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.45.5-14>

Отримано: 28.03.2026 / Переглянуто: 29.04.2026 / Прийнято: 03.05.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

V. V. SEREDENKO

Senior Lecturer at the Department of Composite Structures and Aviation Materials Science

e-mail: seredenkovikt@gmail.com ORSID ID: <https://orcid.org/0009-0009-7282-8046>

National Aerospace University "KhAI",

17, Vadym Manko, Str., Kharkiv, 61000, Ukraine

ANALYSIS OF THE WATER RESOURCES STATE IN KHARKIV REGION

Purpose. Analysis of the state of water resources in the Kharkiv region, assessment of anthropogenic impact under current conditions.

Methods. System analysis.

Results. The Kharkiv region is characterized by a low capacity of water resources. In the region, water resources are formed due to the inflow of surface water from the Siverskyi Donets River, local river runoff, as well as sewage, mine and quarry waters. The analysis shows a gradual decrease in water consumption from natural sources in recent years, while industry remains the main consumer. Periodic exceedances of permissible norms for turbidity, color, total hardness and concentrations of iron, sulfates, nitrates, ammonia, chlorides and fluorine have been identified. Currently, water quality remains unstable due to the combined impact of industrial discharges and the consequences of military operations. A comparative analysis of monitoring data for the past year revealed a cautious trend towards improving surface water in terms of organic pollution (BOD5) and mineralization (sulfates, chlorides).

Conclusions. The hydroecological situation in Kharkiv is due to the introduction of martial law and climate change. An urgent need for modernized intake systems and additional water purification measures has been identified.

KEYWORDS: *groundwater, surface water, consumption, water chemical parameters*

Conflict of Interest

The author declares that there is no conflict of interest regarding the publication of this manuscript. The author fully adhered to ethical standards, including issues of plagiarism, data fabrication, and duplicate publication.

AI Statement

This study did not use generative artificial intelligence.

References

1. Snizhko, S., Shevchenko, O., & Didovets, Yu. (2021). Analysis of the impact of climate change on water resources of Ukraine (Full report on project results). Ecoaction Center for Environmental Initiatives. (in Ukrainian)
2. Kulyk, M. I., & Lisniak, A. A. (2024). Assessment of surface water quality 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)
3. Borysenko, K., Hutchinson, S. M., & Sinchuk, D. (2024). Manifestations and consequences of water conflicts: A case study of the Pechenihy Reservoir, Kharkiv region, Ukraine. *Journal of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*, (60), 173-187. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-12> (in Ukrainian)
4. Kharkiv Regional State Administration. (2024). Ecological passport of the Kharkiv region for 2024. Retrieved from <https://kharkivoda.gov.ua/oblasna-derzhavna-administratsiya/struktura-administratsiyi/strukturni-pidrozdzili/486/2736/132692> (in Ukrainian)
5. Analysis of water quality in water bodies of the Kharkiv region. (2024). In *Realities and development strategies of Ukraine: Domestic and foreign experience*, (pp. 82-94). SG NTM "Novyi Kurs". Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/385416742> (in Ukrainian)
6. Lisniak, A. A., & Kulyk, M. I. (2024). Assessment of water quality from various water supply sources in the Kyivskyi district of Kharkiv. *Journal of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Ecology"*, (30), 36-48. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2024-30-03> (in Ukrainian)
7. Lisniak, A. A., Kulyk, M. I., & Torma, S. (2025). Drinking water quality from various sources in the Shevchenkivskyi district of Kharkiv. *Man and Environment. Issues of Neoecology*, (44), 35-46. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2025-44-03> (in Ukrainian)
8. Kharkiv Regional Center for Disease Control and Prevention. (2026). Results of laboratory testing of water from non-centralized water supply sources in the Kharkiv region for 3 months of 2026. Retrieved from

- <https://kh.cdc.gov.ua/news/rezultaty-laboratornyh-doslidzen-vody-z-dzherel-netsentralizovanogo-vodopostachannya-na-terytoriyi-harkivskoyi-oblasti-za-3-misyatsi-2026-roku/> (in Ukrainian)
9. Vasylenko, L., Berezhnyska, Yu., Kravchenko, M., Shevchenko, O., & Tsioma, T. (2022). Pollution of surface waters with phosphates and heavy metals. *Problems of Water Supply, Sewerage and Hydraulics*, (38), 4-17. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2022.38.4-17> (in Ukrainian)
 10. Kireitseva, G., Tsyhanenko-Dziubenko, I., Zamula, I., & Demchuk, L. (2024). Analysis of the state and monitoring of surface water bodies in the Chernihiv region. *Bulletin of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 1(144), 84-91. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.1.11> (in Ukrainian)
 11. Kharkiv Regional State Administration. (2023). Report on the state of the natural environment in the Kharkiv region in 2023. Retrieved from https://kharkivoda.gov.ua/content/documents/1285/128411/Attaches/regionalna_dopovid_2023_harkiv.pdf (in Ukrainian)
 12. Kharkiv Oblast Council. (2024). Program of economic and social development of the Kharkiv region for 2024. Retrieved from <https://oblrada-kharkiv.gov.ua/program/programa-ekonomichnogo-i-soczialnogo-rozvytku-harkivskoyi-oblasti-na-2024-rik/> (in Ukrainian)
 13. Kharkiv Regional State Administration. (2025). Analytical report on the environmental state of Kharkiv and the Kharkiv region for March 2025. Retrieved from <https://kharkivoda.gov.ua/oblasna-derzhavna-administratsiya/struktura-administratsiyi/strukturni-pidrozdili/486/2736/131109> (in Ukrainian)
 14. Kharkiv Regional State Administration. (2026). Analytical report on the environmental state of Kharkiv and the Kharkiv region for March 2026. Retrieved from https://kharkivoda.gov.ua/content/documents/1354/135322/Attaches/dovidka_monitoring_za_berezen_2026.pdf (in Ukrainian)
 15. Kharkiv Regional Center for Disease Control and Prevention. (2024). Results of laboratory testing of water from centralized water supply sources in the Kharkiv region for 2024. Retrieved from <https://kh.cdc.gov.ua/news/6721/> (in Ukrainian)
 16. Tertytskyi, Ye. P. (2024). Ecological infrastructure and its role in sustainable urban development: Analysis and prospects. *Journal of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Ecology"*, (30), 63-75. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2024-30-05> (in Ukrainian)
 17. Kravchenko, O., Vasyliuk, O., Voitsikhovska, A., & Norenko, K. (2015). Research on the impact of military actions on the environment in eastern Ukraine. *Skhid*, (2), 118-123. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Skhid_2015_2_23 (in Ukrainian)
 18. Velychko, S., & Dupliak, O. (2023). The impact of full-scale aggression on water bodies as water supply sources. *Problems of Water Supply, Sewerage and Hydraulics*, (45), 5-14. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.45.5-14> (in Ukrainian)

Submission received: 28.03.2026 / Revised: 29.04.2026 / Accepted: 03.05.2026 / Published: 30.05.2026

<https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-04>

УДК (UDC): 504.03:911.52(477.46)

S. P. SONKO¹, DSc (Geography), Prof.,
Professor of the Department of Ecology and Life Safety
e-mail: sp.sonko@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7080-9564>

A. S. NIEZHENTSEV¹,
PhD Student of the Department of Ecology and Life Safety
e-mail: nejencev@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-8234-0681>

¹*Uman National University,*
1, Instyutaska St., Uman, Cherkasy Region, 20305, Ukraine

DYNAMICS OF FORMATION OF ECOSYSTEM RELATIONSHIPS IN ROADSIDE LANDSCAPES OF THE LEFT-BANK PART OF CHERKASY REGION

Purpose. A study of the dynamics of new ecosystems forming as a result of highway construction on sites that were once natural or anthropogenically altered landscapes, with a view to restoring future biodiversity.

Methods. Field observation and photographic documentation, geochemical analysis, and instrumental monitoring.

Results. The authors focused primarily on the ecosystemic aspect of the broader issue—the anthropogenic transformation of natural landscapes. This is because ruderal vegetation, which largely forms new ecotopes resulting from human activity, plays a restorative role for degraded substrates. It actively participates in biogeochemical processes and is a key factor in the restoration of native flora following its complete destruction due to road construction. An assessment was made of the differences between roadside ecosystems on the left bank of the Cherkasy region (Kaniv–Zolotonosha–Chornobai route) and local ecosystems. The greatest prevalence of species from the Asteraceae family was observed. In addition, the spread of invasive flora was recorded in all studied areas. At the same time, ruderal and native flora families along roadways jointly contribute to the formation of ecosystem connections. Polygons were identified where abnormal deviations in the studied indicators were observed.

Conclusions. Roads function as habitats, sources, sinks, barriers and channels. As habitats, road corridors can support entire populations of plants and animals and may be important for their conservation. If they contain some of the last local or seed habitats of a species, they may be critically important. The study of individual parameters that characterize the formation of ecosystem ties in roadside landscapes of highways of the right bank of the Cherkasy region and the comparison of these parameters with the National Biotope Catalog allows us to establish certain patterns of the distribution of ruderal vegetation, which will subsequently form ecosystems resistant to external disturbances.

KEYWORDS: *ecosystem connection ecosystem, roadside, vegetation, group, invasive, landscape, ruderal, human activity*

Як цитувати: Sonko S. P., Niezhentsev A. S. Dynamics of formation of ecosystem relationships in roadside landscapes of the left-bank part of Cherkasy region. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2026. Вип. 45. С. 43–54. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-04>

In cites: Sonko, S. P., & Niezhentsev, A. S. (2026). Dynamics of formation of ecosystem relationships in roadside landscapes of the left-bank part of Cherkasy region. *Man and Environment. Issues of Neoecology*, (45), 43–54. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-04>

Introduction

Modern scientific methodology requires adaptation to the growing demand of society for ecosystem services [1], not only in purely natural territories, but also in anthropogenically altered

landscapes. Most foreign sources emphasize the priorities of ecosystem dynamics precisely when conducting monitoring studies of roadside strips [2]. And in the most developed countries, this ap

proach to monitoring is already embodied in specific practical guidelines for road services [3].

According to the authors, natural landscapes, the stability of which is supported by the appropriate ecosystem dynamics, should become the standard with which any human interference and impact on the environment should be compared. Thanks to the presence of the phenomenon of life, the biosphere can "fight" with such influences in different ways - eliminate, tolerate, adapt, and nullify. Actually, this phenomenon is in the subject field of modern ecology as a science of the relationship between the body and the environment.

Therefore, with any human intervention in the ecosystem dynamics in the process of forming anthropogenic landscapes (including road ones), it is necessary to expect an adequate response of natural ecosystems in the form of the formation of adaptation mechanisms. In other language, on the site of the former natural ecosystem as a result of road construction, ecosystems adapted to new conditions are formed, which one of the authors calls «noospheric» [4]. In fact, ecosystems adapted to anthropogenic intervention are formed with phenomenal speed in roadside landscapes, the completeness of the formation of which was studied by us earlier [5]. Previous studies conducted using this methodological approach covered the right-bank part of the Cherkasy region [6]. Therefore, in order to logically complete the complete study of the region's territory, we continued to implement this approach to the rest of the region's territory, namely, to the left-bank part of it. Actually, this publication is dedicated to the results of such research.

Modern scientific methodology requires adaptation to the growing demand of society for ecosystem services [1], not only in purely natural territories, but also in anthropogenically altered landscapes. Most foreign sources emphasize the priorities of ecosystem dynamics precisely when conducting monitoring studies of roadside strips [2]. And in the most developed countries, this approach to monitoring is already embodied in specific practical guidelines for road services [3].

According to the authors, natural landscapes, the stability of which is supported by the appropriate ecosystem dynamics, should become the standard with which any human interference and impact on the environment should be compared. Thanks to the presence of the phenomenon of life, the biosphere can «fight» with such

influences in different ways - eliminate, tolerate, adapt, and nullify. Actually, this phenomenon is in the subject field of modern ecology as a science of the relationship between the body and the environment.

Therefore, with any human intervention in the ecosystem dynamics in the process of forming anthropogenic landscapes (including road ones), it is necessary to expect an adequate response of natural ecosystems in the form of the formation of adaptation mechanisms. In other language, on the site of the former natural ecosystem as a result of road construction, ecosystems adapted to new conditions are formed, which one of the authors calls «noospheric» [4]. In fact, ecosystems adapted to anthropogenic intervention are formed with phenomenal speed in roadside landscapes, the completeness of the formation of which was studied by us earlier [5]. Previous studies conducted using this methodological approach covered the right-bank part of the Cherkasy region [6]. Therefore, in order to logically complete the complete study of the region's territory, we continued to implement this approach to the rest of the region's territory, namely, to the left-bank part of it. Actually, this publication is dedicated to the results of such research.

On domestic territory, the priorities of ecosystem dynamics when conducting monitoring studies of road landscapes are indicated only in a few works [5; 7; 8; 9].

In particular, in geographical works it is proposed to define the basic geosystem as a genetic ecological and geospatial model of the landscape, the central (controlled) component of which is ground cover. Ground cover combines phenomena of biotic and social origin, which are fundamental to the definition of ecosystem services [10]. From a theoretical point of view, this approach brings scientific methodology closer to biosphere (ecosystem) dynamics through the symbiosis of Earth sciences (geography, landscape science) with life sciences (ecology, ecosystemology).

Most environmental studies of roads usually focus on their harmful effects, and these biases prevent a full assessment of the environmental functions of roads. The characteristic features of the roads are their narrow continuous shape with a fairly large area of roadsides (compared to the core), which support ecosystems other than nearby lands. The impact of the roadside is stronger because roads have a much

higher density of terrain, are impenetrable, always carry people and vehicles that themselves create some noise, light, pollution and physical obstacles [2].

The effects of the edge of the road are intensified, as many of them are permanent. According to the Wildlife crossing structure handbook design and evaluation in North America [3], the overall impact of roads and transport infrastructure on biodiversity is three-way:

- Many types of impact on certain sections of the road are cumulative - accumulation of pollutants from vehicles, maintenance of roadside agricultural land, support of surface water by road embankments.

- The impact of several roads is cumulative at the level of a particular landscape, as new roads are being built and old ones are not eliminated. This increases the impact on the «untouched» particles of natural ecosystems, which contributes to their fragmentation.

- Some negative effects have a delayed effect, such as fragmentation effects that prevent the re-colonization of residual habitats by the fauna and the increase in the number of ruderal and invasive flora.

The work *Effects of road age and distance on plant biodiversity: A case study in the Yellow River Delta of China* [11] investigated the impact of distance from the side of the road and the road on the richness, diversity and composition of plant species in 17 sites. The results showed that there were more species near the side of the road than further from the side of the road (>200 m). Species richness and plant diversity increased with the age of the road at most measured distances, while species richness on the side of the road increased significantly with the age of the road and peaked at the age of the road 20 years after the richness of the species stabilized.

Monitoring studies of the Kyiv-Odesa highway as a landscape engineering system but along its entire length were carried out in 2021 by R.V. Didura. According to the author, road landscape engineering systems (DLIS) are zonal-azonal structures of technogenic origin and their knowledge is possible at the geotechnical level, covering knowledge of natural geography, landscape science, technology, economics, ecology, etc. [9].

Geochemical studies are devoted to the accumulation of micro-elements (Cu, Pb, Zn, Cd) by the phytomass of plants of technogenically transformed ecotopes (on the example of m.

Cherkasy) was carried out by N.M. Kornelyuk and S.M. Konyakin [12].

Our main focus was on the environmental, more precisely the ecosystem aspect of the identified problem. It is important that the communication routes we have selected within the Cherkasy region are almost completely "covered" by the Galicia-Slobozhan ecological corridor, which is a significant part of the national ecological network [13].

When analyzing the above works, it is important to pay attention to the following quantitative and qualitative parameters of roadside landscapes, which can affect their ecosystem dynamics:

- The species composition of plant groups, which can be an indicator of individual road impacts, for example, the presence of halophytic plants indicates the fight against glaciation with salt [14], or the soil washing regime is insufficient; the presence of invasive plants - the intensity of their seed transfer by vehicles or birds; the presence of hydrophytic plants, which may indicate insufficient drainage of the roadway (aquifers), etc.

- External signs of animal life in roadside areas (anthills, burrows, excrement, predator hunting, animal remains, etc.) to assess the completeness of ecosystem relationships in roadside ecosystems.

- Signs of disruption of ecosystem dynamics on the road (fragmentation of ecotopes, death of animals as a result of traffic, etc.).

A certain synthesis of these theoretical approaches is the concept of noospheric ecosystems. It investigates the evolution of the noospheric development of mankind, the main spatial consequence of which is the formation of three groups of elements of territorial structure. These three groups form a modified ecological niche of our species. In particular, there are three types of noospheric ecosystems – agroecosystems (planar, areal), urboecosystems (cell, nodal) and infraecosystems (linear, network), which have all the features of the ecosystem and are in complex interdependent relationships with each other [4]. Thus, considering infraecosystems as part of the ecological niche of Homo Sapiens, we preserve the ecosystem essence of all road landscapes, since for the most part their artificial nature depends entirely on man, who regulates their species diversity, being, however, limited by general physical and geographical conditions.

Therefore, road landscapes (according to the current classification [15], we will consider as infraecosystems (from the term «infrastructure») according to the concept of noospheric ecosystems [4].

Our research focused on determining the dynamics and directions of development of roadside ecosystems that are formed on the left bank of the Cherkasy region. The main questions that needed to be answered were:

1. How significantly are the roadside ecosystems of the left-bank Cherkasy region (directions Kaniv - Zolotonosha - Chornobay) different from the natural ecosystems of this area. In particular, the assessment of all (or some types of influences). Soil composition, hydrological regime, phyto- and zoo-varianation, dustiness, noise pollution, radiation background, etc. That is, determining the current state of roadside ecosystem data using a number of indicators.

2. How these ecosystems have adapted to the conditions of anthropogenic influence (changes in the species composition of plants and animals, the formation of new trophic relationships, etc.).

3. What should be done to reduce the negative impact of transport activities on a new ecosystem adapted to environmental conditions.

Monitoring studies were carried out by route by car along the following roads: Zgar village – Pishchane village – Sofiivka village – Nova Dmytrivka village – Kropyvna village – Irkliiv – the border of Cherkasy and Poltava regions on the Kremenchuk reservoir – Novy Kovray village – Chekhiv pumping station). In total, 9 stops were made for measurements and appropriate sampling. Stops were made at the branches of the side roads adjacent to the main one in order to move sideways (right or left) for a distance of up to 50 m to determine the degree of change in

ecosystem interconnections depending on the distance from the main route [16].

Our research focused on determining the dynamics and directions of development of roadside ecosystems that are formed on the left bank of the Cherkasy region. The main questions that needed to be answered were:

1. How significantly are the roadside ecosystems of the left-bank Cherkasy region (directions Kaniv - Zolotonosha - Chornobay) different from the natural ecosystems of this area. In particular, the assessment of all (or some types of influences). Soil composition, hydrological regime, phyto- and zoo-varianation, dustiness, noise pollution, radiation background, etc. That is, determining the current state of roadside ecosystem data using a number of indicators.

2. How these ecosystems have adapted to the conditions of anthropogenic influence (changes in the species composition of plants and animals, the formation of new trophic relationships, etc.).

3. What should be done to reduce the negative impact of transport activities on a new ecosystem adapted to environmental conditions.

Monitoring studies were carried out by route by car along the following roads: Zgar village – Pishchane village – Sofiivka village – Nova Dmytrivka village – Kropyvna village – Irkliiv – the border of Cherkasy and Poltava regions on the Kremenchuk reservoir – Novy Kovray village – Chekhiv pumping station). In total, 9 stops were made for measurements and appropriate sampling. Stops were made at the branches of the side roads adjacent to the main one in order to move sideways (right or left) for a distance of up to 50 m to determine the degree of change in ecosystem interconnections depending on the distance from the main route [16].

Research methodology

In total, 5 stops were made on the first route and 5 stops on the second route for appropriate measurements and sampling.

The following types of measurements and observations were performed at each of the polygons (sampling points):

- Fixation of geographical coordinates;
- Measurement of the radiation background with a TERRA-P dosimeter;
- Photographing the plant and animal world directly near the roadway and 25-

30 meters from it (10 photos each) (Nikon 5000 camera);

- Taking soil samples directly near the roadway and 25 meters from it (1 kg per bag) with subsequent chemical analysis;
- Noise level measurements (Benetech GM1351);
- Fixing the number of vehicles;
- Dust measurements with data entry into the appropriate log (PM2.5 Walcom SR-516A log dust meter);



Fig. 1 – Polygon №2. Marshal gas station near the village of Pishchane

- Air quality measurements with an Air quality detector.
The results of measurements and fixation are shown in Fig. 1.

The main methods that were applied: polygon method, comparative, cartographic, visual observation and photofixation.

Results

Approaches to the formation of ecotopes in anthropogenic landscapes are important from a methodological point of view. We adhere to the methodological scheme of R.I.Burda. According to the author, the nature and degree of anthropogenic transformation of locations, habitats, as well as biotopes, determines the formation of specific features of an anthropogenic dwelling as a habitat in which at least one of the abiotic or biotic components has undergone changes as a result of direct or indirect anthropogenic impact [17].

The prerequisites for creating a motivated, fast, open, understandable, accessible and simple classification of anthropogenic habitats are to take into account a number of their characteristics. The most important of them are.

1. Location of environments relative to the relief.

2. Place of growth (biological cycle).
3. The absence of a single dominant vegetation cover is the mandatory participation of determinants reflecting anthropogenic changes in the biotope and phytotype.
4. Variety of types of nature use.

We tend to identify road embankments as eluvial habitats located on elevated relief elements, because each road has an elevated embankment.

In general, ruderal phytocenoses in urbanized and man-made conditions can become ecological niches for many species of fauna and contribute to ecosystem regeneration [18]. At the same time, ruderal groups are the main centers of distribution of alien species, especially those with high invasion potential and transformer species, which pose a real threat to the biodiversity of natural ecosystems [19].

In addition to the listed indicators and characteristics, quantitative assessments of the degree of biodiversity were also used [20].

At this stage of research, the main attention was paid to the identification of individual species of plants and plant groups. The authors will receive the rest of the results after conducting laboratory studies of soil samples, plant samples and analysis of biodiversity. The data of expeditionary monitoring studies were entered in the relevant table (Table 1.).

In the future, to increase the clarity in the comparative analysis, the method of petal diagrams was used (Fig. 2), using the indicators reflected in Table. 1.

The vegetation is represented by the families: Amaranthaceae Juss. (Amaranth); Apocynaceae Juss. (Swalloom); Asteraceae Bercht. & J.Presl (Asters); Boraginaceae Juss. (Roarse); Brassicaceae Burnett (Cabbage or Cruciferous); Caryophyllaceae Juss. (Cloves); Fabaceae Lindl. (Legumes); Euphorbiaceae Juss. (Eauth or milkweed); Hypericaceae Juss. (St. John's Wort); Lamiaceae Martinov (Deaf nettle or lip-flowered); Papaveraceae Juss. (Popies); Poaceae Barnhart (Thin-legged); Polygonaceae Juss. (Buck); Portulacaceae Juss. (Portulace); Ranunculaceae Juss. (Zhovtetsev); Rosaceae Juss. (Roses or Pink); Rubiaceae Juss. (Maren); Sapindaceae Juss. Equisetaceae Michx. ex DC. (Horsetails); Apiaceae Lindl. (Circular or umbrella); Convolvulaceae Juss. (Birch); Geraniaceae Juss. (Crane, geranium); Scrophulariaceae Juss. Urticaceae Juss. (Nettles); Balsaminaceae A. Rich. (Balsamins); Malvaceae Juss. (Malva); Plantaginaceae Juss. (Podant); Violaceae Batsch. (Violet); Cannabaceae Martinov. (Hemp); Cyperaceae Gen. Pl. (Osoceae);

Onagraceae Juss. (Onagrovi); Solanaceae Juss. (Solanaceae); Sapindaceae Juss. (Sapind); Aristolochiaceae Juss. Salicaceae Mirb. (Willow); Ulmaceae Mirb. (Elm). The most common are plants of the aster family.

The spread of invasive plants such as: *Asclepias syriaca* L. (Syrian Vatochnik), *Ambrosia artemisiifolia* L. (Ambrosia polynolist), *Erigeron annuus* (L.) Desf. (One-year-old), *Euphrosyne xanthiifolia* (Nutt.) A.Gray, *Robinia pseudoacacia* L. (Robinia common), *Erigeron canadensis* L. (Canadian Zlinka), *Acer negundo* L. (Ash-leaved maple), *Ulmus pumila* L. (Elm low, dwarf), *Solidago canadensis* L. (Canadian gold).

Analyzing Table 2 by the number of recorded species, polygons 1 (Zgar village) and 5 (Kropyvna village), 36 and 44, respectively, draw attention. They also have the largest number of plants that are characteristic of the corresponding biotopes from the national catalog, respectively 13 and 14.

The visual relationship between the overall air quality and the number of recorded plant species (as, for example, at polygons 1,2,3,8) requires the use of correlation analysis, to which the authors will devote their future research. The same applies to the relationship between the noise level and the total number of plants. For the 1st and 5th polygons, such a visual dependence should be confirmed by the results of correlation analysis.

The remaining indicators given in the table can play with new colors if they are supplemented with future results of plant repeatability, as well as in the case of their comparison using the method of petal diagrams, which the authors will certainly do upon completion of the processing of these expeditionary studies.

Conclusions

Roads perform various ecological functions that affect wildlife.

Roads function as habitats, sources, sinks, barriers and channels. Depending on the road, its location and the number of vehicles that move it, some of these features can be of important environmental importance.

As habitats, road corridors can contain entire populations of plants and animals and may be important for their preservation. If they contain

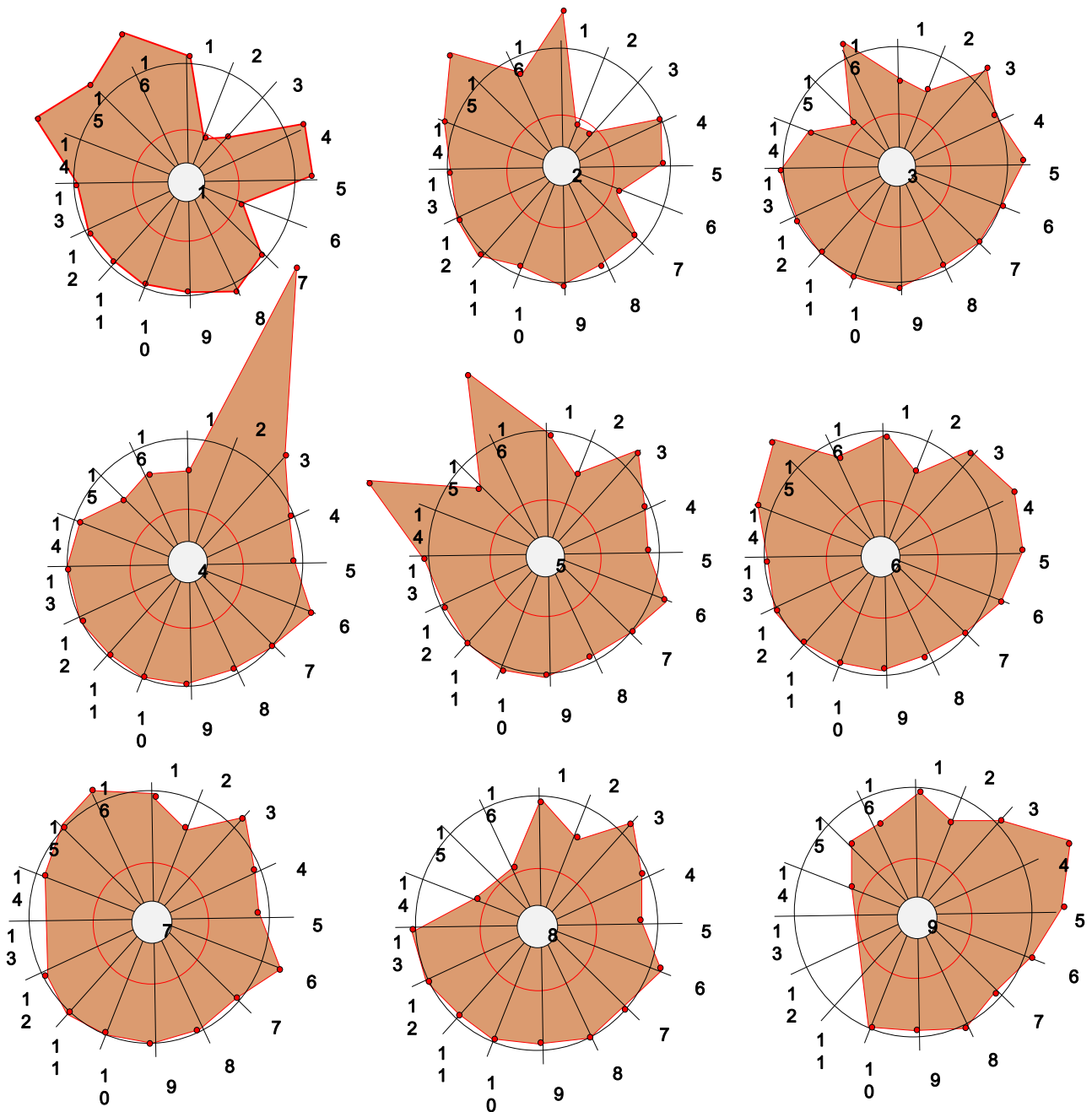
some of the species' recent local or seed habitats, they may be critical

The study of individual parameters that characterize the formation of ecosystem connections in the roadside landscapes of the right bank of the Cherkasy region and the comparison of these parameters with the National Catalog of Biotopes allows us to establish certain patterns of distribution of ruderal vegetation, which will subsequently form ecosystems resistant to external disturbances.

Table 1

Some parameters of the dynamics of the formation of roadside ecosystems along the roads of the left-bank part of the Cherkasy region

№	Sampling points	Geographical coordinates	Total air quality (points)	Phenols (mg/m ³)	Organ. compounds	Dust particles PM 2.5(ug/m ³)	Dust particles PM 10(ug/m ³)	CO (ppm)	CO ₂ (ppm)	Temperature (°C)	Humidity (%)	Radiation background (mSv/h)	Noise level of trucks (db)	Noise level of car (db)	Noise level of passenger cars (db)	Number of plant species (unit)	Number of invasive species (units)	Number of plant species from the national biotope catalog (un.)
1	Zgar vil.	49°39'23,1" N 32°06'34,8" E	4	0,008	0,09	025	032	003	0443	31,2	52	0,13	83,4	78,5	80,2	36	4	13
2	Pishchane vil.	49°44'00,9" N 31°52'33,0" E	5	0,008	0,009	017	022	003	0437	23,3	56	0,13	90,9	85,5	82,5	26	5	6
3	Sofiiivka vil.	49°52'10,0" N 31°44'00,0" E	2	0,053	0,604	017	032	012	0531	22,3	61	0,16	88,8	82,3	87,3	18	1	8
4	N. Dmytrivka vil.	49°42'05,9" N 31°58'42,5" E	2	0,555	0,613	016	020	013	0501	23,7	55	0,14	87,4	84,0	89,0	21	2	5
5	Kropyvna vil.	49°38'10,6" N 32°10'56,6" E	3	0,053	0,598	016	020	013	0502	22,5	56	0,16	87,5	82,4	86,3	44	2	14
6	Irkliiv city	49°30'53,9" N 32°23'02,3" E	3	0,052	0,579	025	032	013	0480	23,5	50	0,13	87,3	88,6	83,9	29	5	6
7	Border of region	49°28'38,2" N 32°39'50,0" E	3	0,052	0,565	016	020	013	0502	27,4	49	0,15	88,1	81,15	-	21	3	9
8	Novy Kovray vil	49°28'38,2" N 32°39'50,0" E	3	0,052	0,566	016	020	012	0537	25,7	50	0,15	89,18	84,9	88,2	6	-	1
9	Chekhovka pumping station	49°30'14,4" N 32°13'17,2" E	3	0,050	0,540	029	038	012	0476	26,0	49	0,13	-	-	-	9	2	5



Symbols: - numbers of polygons (observation points), respectively, respectively, 1 – Zgar village; 2 – Pishchane village; 3 – Sofiivka village; 4 – Dmytrivka village; 5 – Kropyvna village; 6 – Irkliiv city; 7 – border of Cherkasy and Poltava regions; 8 – Novy Kovray village; 9 – Chekhovka pumping station. Indicators: 1 – Total air quality (points); 2 – Phenols (mg/m³); 3 – Organ. compounds (mg/m³); 4 – Dust particles PM 2.5(ug/m³); 5 – Dust particles PM 10(ug/m³); 6 – CO (ppm); 7 – CO₂ (ppm); 8 – Temperature (oC); 9 – Humidity (%); 10 – Radiation background (μSv/h); 11 – Noise level of trucks (db); 12 – Noise level of passenger vehicles (db); 13 – Noise level of passenger vehicles (db); 14 – Number of plant species (units) ; 15 – Number of invasive species (unit) ; 16 – Number of plant species from the national biotope catalog (dis.) Plant groups at individual points of study are formed by almost all families of ruderal and aboriginal flora.

Fig. 2 – Images of parameters that reflect the dynamics of roadside ecosystems using the petal diagram method

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.

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

In this study, generative artificial intelligence was not used.

References

1. Sonko, S., Maksymenko, N., Vasylenko, O., Chornomorets, V., Koval, I. (2021). Biodiversity and landscape diversity as indicators of sustainable development. *E3S Web of Conferences*, 255, 01046. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125501046>
2. Simcock, R., Innes, J., Samarasinghe, O., Lambie, S., Peterson, P., Glen, A., Faville, N. (2022). Road edge-effects on ecosystems: A review of international and New Zealand literature, an assessment method for New Zealand roads, and recommended actions. *Waka Kotahi NZ Transport Agency research report*. Retrieved from <https://www.nzta.govt.nz/assets/resources/research/reports/692/692-road-edge-effects-on-ecosystems.pdf>
3. Wildlife crossing structure handbook design and evaluation in North America. Chapter 2 – Wildlife populations and road corridor intersections. Retrieved from https://www.fhwa.dot.gov/clas/ctip/wildlife_crossing_structures/ch_2.aspx
4. Sonko, S. (2019). Man in Noosphere: Evolution and Further Development. *Philosophy and Cosmology*, 22, 51–75. <https://doi.org/10.29202/phil-cosm/22/5>
5. Kravtsova, I., Sonko, S., Vasylenko, O., Gursky, I., & Ogilko, S. (2024). Formation of biocenoses in roadside landscapes of Cherkasy Region. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"* (61), 313–328. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-25>
6. Sonko, S., Mamchur, T., Kravtsova, I., Mostoviak, I., Kyselov, Yu. (2023). Geobotanical study of ruderal vegetation in the geoecological monitoring program of roadside ecosystems of the Cherkasy region. *Scientific Bulletin of Chernivtsi University: Geography*, (842), 103–111. <https://doi.org/10.31861/geo.2023.842.103-111>
7. Ogilko, S. P. (2023). Current priorities of monitoring research of roadside ecosystems (on the example of highways of the Cherkask region). *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology*, (29), 26–36. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2023-29-03> (in Ukrainian)
8. Adamova, H. V. (2021). A comprehensive ecological and analytical assessment of the ‘vehicle–road–environment’ system, using a section of the M-29 road as an example. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series 'Ecology'*, (25), 55–69. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2021-25-05> (in Ukrainian)
9. Didura, R.V. (2021). Road Landscape Engineering Systems: Structure and Optimisation (using the Kyiv–Odesa motorway as an example): PhD thesis: 11.00.11. Vinnytsia. Retrieved from <https://vspu.edu.ua/content/graduate/doc/a23dis.pdf> (in Ukrainian)
10. Kruhlov, I. (2016). The Basic Geo-Ecosystem (B-GES) as an Integrating Object of Transdisciplinary Geo-Ecology. *Scientific Notes of the Volodymyr Hnatiuk Ternopil National Pedagogical University. Series: Geography*. (2(41)). Retrieved from <http://dspace.tnpu.edu.ua/handle/123456789/7111> (in Ukrainian)
11. Sheng-Lan Zeng, Ting-Ting Zhang, Yu Gao, Bin Zhao. (2011). Effects of road age and distance on plant biodiversity: A case study in the Yellow River Delta of China. *Plant Ecology, Follow journal*, 212(7), 1213–1229. <https://doi.org/10.1007/s11258-011-9899-x>
12. Korneliuk, N.M., Koniakin, S.M. (2020). Characteristics of the seasonal accumulation of trace elements (Cu, Pb, Zn, Cd) in the plant biomass of anthropogenically transformed ecosystems (using the city of Cherkasy as an example). *Scientific and Practical Journal 'Ecological Sciences'*. 1(28), 335–343. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.1-28.54> (in Ukrainian)
13. Boiko, O.V., Honchar, O.F., Havrysh, O.M., Osokina, T.H. (2019). The Development of an Ecological Network in the Cherkasy Region. *Agroecological Journal*, (3),. 14–19. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2019.183463> (in Ukrainian)
14. Halofity. Environmental Glossary. Retrieved from <https://jak.koshachek.com/articles/galofiti-ekologichnij-slovník-enciklopedii.html> (in Ukrainian)
15. Denysyk, H.I., Valchuk-Orkusha, O.M. (2017). Classification and optimisation of road landscapes. *International Scientific and Practical Conference «WORLD SCIENCE»*, 2(8(24)). Retrieved from

<https://dspace.vspu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/a2b27fcb-96df-4834-9aae-17e8b74be63f/content> (in Ukrainian)

16. Sonko, S., Niezhentsev, A. (2025). Determining the route for a monitoring study of roadside ecosystems forming along highways in the left-bank part of Cherkasy Oblast. *Current issues of formal and non-formal education in environmental monitoring and conservation: Abstracts of IV International Internet-conference (Ukraine, Kharkiv, April 18, 2025)*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University, 2025. 141-143. Retrieved from <https://ekhnur.karazin.ua/handle/123456789/21447> (in Ukrainian)
17. Burda, R.I. (2012). Principles for developing classification schemes for habitats based on anthropogenic ecosystems by land-use type. In Y.P. Didukh, O.O. Kagala, B.G. (Eds.). *Biotopes (habitats) of Ukraine: scientific foundations for their study and practical results of the inventory*. (Proceedings of the workshop. Kyiv, 21–22 March 2012). Prots. Kyiv–Lviv, 52-56. <https://doi.org/10.13140/2.1.1167.2000> (in Ukrainian)
18. Kuzemko, A.A., Didukh, Y.P., Onyschenko, V.A., Sheffer, Y. (Eds.). (2018). National Catalogue of Biotopes of Ukraine. Kyiv: Y.Y. Klymenko Sole Proprietorship. Retrieved from <https://geobot.org.ua/files/publication/1828/catalog.pdf> (in Ukrainian)
19. Dubyna D.V., Yemelianova S.M., Dziuba T.P., Ustymenko P.M., Felbaba-Klushynal M., Davydova A.O., Davydov D.A., Tymoshenko P.A., Baranovskyi B.O., Borsukevych L.M., Vakarenko L.P., Vynokurov D.S., Datsiuk V.V., Yeremenko N.S., Ivanko I.A., Lysohor L.P., Kazarinova H.O., Karmyzova L.O., Makhynia L.M., Pashkevych N.A., Fitsailo T.V., Shevera M.V., Shyriaieva D.V. (2021). Ruderal vegetation of Ukraine: syntaxonomic diversity and spatial differentiation. *Black Sea Botanical Journal*, 17 (3), 253–275. <https://doi.org/10.32999/ksu1990-553X/2021-17-3-5> (in Ukrainian)
20. Voievoda, V., Sovhira, S., & Darmofal, E. (2025). The impact of climate change on the biodiversity of protected areas and its implications for the economy of protected areas. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 359(6.1), 94-98. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-12> (in Ukrainian)

Submission received: 03.03.2026 / Revised: 05.04.2026 / Accepted: 16.04.2026 / Published: 30.05.2026

С. П. СОНЬКО¹, д-р географ. наук, проф.,
професор кафедри екології та безпеки життєдіяльності
e-mail: sp.sonko@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7080-9564>

А. С. НЕЖЕНЦЕВ¹,
аспірант кафедри екології та безпеки життєдіяльності
e-mail: nejencev@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-8234-0681>

¹Уманський національний університет,
вул. Інститутська, 1, м. Умань, Черкаська обл., 20305, Україна

ДИНАМІКА ФОРМУВАННЯ ЕКОСИСТЕМНИХ ВІДНОСИН У ПРИДОРОЖНІХ ЛАНДШАФТАХ ЛІВОБЕРЕЖНОЇ ЧАСТИНИ ЧЕРКАСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Мета. Дослідження динаміки формування нових екосистем, що формуються в результаті будівництва автомобільних доріг на місці колишніх природних або антропогенно змінених ландшафтів для відновлення майбутнього біорізноманіття.

Методи. Польові спостереження та фотофіксації, геохімічний, інструментально-моніторинговий.

Результати. Приділено пріоритетну увагу екосистемному аспекту антропогенізації природних ландшафтів. Оскільки рудеральна рослинність, яка здебільшого формує нові екотопи, що виникають в результаті антропогенної діяльності, відіграє відновлювальну роль для деградованих субстратів; а бере активну участь у біогеохімічних процесах та є важливою умовою для відновлення аборигенної флори після її повного знищення в результаті дорожньо-будівельних робіт. Екосистемні зв'язки у придорожніх ландшафтах досліджувались шляхом вивчення видового складу рослинних угруповань, зовнішніх ознак життя тварин у придорожніх зонах, ознак порушення динаміки екосистем дорогою (фрагментація екоотопів, загибель тварин внаслідок наїзду транспортних засобів тощо). Динаміка придорожніх екосистем досліджувались шляхом реєстрації та подальшого порівняння рослинності з її відповідним списком у Національному каталозі біотопів. Зроблена оцінка відмінності придорожніх екосистем лівобережжя Черкаської області (напрямки Канів - Золотоноша - Чорнобай) від місцевих екосистем. Встановлено найбільше поширення

представників родини Айстрових (Asteraceae). Крім того, на всіх досліджуваних ділянках зафіксовано поширення інвазійної флори. Водночас родини рудеральної та аборигенної флори вздовж дорожніх смуг разом беруть участь у формуванні екосистемних зв'язків. Визначено полігони, на яких спостерігаються аномальні відхилення досліджуваних показників.

Висновки. Дороги функціонують як середовища існування, джерела, поглиначі, бар'єри та канали. Як середовища існування, дорожні коридори можуть утримувати цілі популяції рослин і тварин і можуть мати значення для їх збереження. Якщо вони містять деякі з останніх місцевих або насінневих середовищ існування виду, вони можуть бути критично важливими. Дослідження окремих параметрів, які характеризують формування екосистемних зв'язків у придорожніх ландшафтах автошляхів правобережжя Черкаської області і порівняння цих параметрів з Національним каталогом біотопів дозволяє встановити певні закономірності розповсюдження рудеральної рослинності, яка згодом сформує стійкі до зовнішніх збурень екосистеми.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: екосистемний зв'язок, придорожній, рослинність, угруповання, інвазійний, ландшафт, екосистема, рудеральна, антропогенна діяльність

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 дотримувалися 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. Sonko, S., Maksymenko, N., Vasylenko, O., Chornomorets, V., Koval, I. Biodiversity and landscape diversity as indicators of sustainable development. *E3S Web of Conferences*, 2021, 255, 01046. <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57219016936>
2. Simcock R., Innes J., Samarasinghe O., Lambie S., Peterson P., Glen A., Faville N. Road edge-effects on ecosystems: A review of international and New Zealand literature, an assessment method for New Zealand roads, and recommended actions. *Waka Kotahi NZ Transport Agency research report*. 2022. P. 692.
3. Wildlife crossing structure handbook design and evaluation in North America. Chapter 2 – Wildlife populations and road corridor intersections. URL: https://www.fhwa.dot.gov/clas/ctip/wildlife_crossing_structures/ch_2.aspx (дата звернення 26.02.2026)
4. Sonko S. Man in Noosphere: Evolution and Further Development. *Philosophy and Cosmology*. 2019. Vol. 22. P. 51-75. <https://doi.org/10.29202/phil-cosm/22/5>
5. Kravtsova, I., Sonko, S., Vasylenko, O., Gursky, I., & Ogilko, S. Formation of biocenoses in roadside landscapes of Cherkasy Region. (2024). *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*, (61), 313-328. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-25>
6. Sonko S., Mamchur T., Kravtsova I., Mostoviak I., Kyselov Yu. Geobotanical study of ruderal vegetation in the geoeological monitoring program of roadside ecosystems of the Cherkasy oblast. *Науковий вісник Чернівецького університету: Географія* Вип 842, 2023. С.103-111. <https://doi.org/10.31861/geo.2023.842.103-111>
7. Огілько С. П. Сучасні пріоритети моніторингового дослідження придорожніх екосистем (на прикладі автошляхів Черкаської області). *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Екологія»*. 2023. Вип. 29. С.26 -36. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2023-29-03>
8. Адамова Г. В. Комплексна еколого-аналітична оцінка системи «автомобіль – дорога – середовище» на прикладі ділянки дороги М-29. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Екологія»*. 2021. Вип. 25. С. 55–69. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2021-25-05>
9. Дідур Р.В. Дорожні ландшафтно-інженерні системи: структура, оптимізація (на прикладі автотраси Київ–Одеса): дисертація доктора філософії: 11.00.11. Вінниця, 2021. 182 с. URL: <https://vspsu.edu.ua/content/graduate/doc/a23dis.pdf>
10. Круглов І. Базова геоекосистема (Б-ГЕС) як інтегруючий об'єкт трансдисциплінарної геоекології. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: географія*. № 2 (випуск 41). 2016. URL: <http://dSPACE.tnpu.edu.ua/handle/123456789/7111>

11. Sheng-Lan Zeng, Ting-Ting Zhang, Yu Gao, Bin Zhao. Effects of road age and distance on plant biodiversity: A case study in the Yellow River Delta of China. *Plant Ecology, Follow journal*. 2011. 212(7) P. 1213-1229. <https://doi.org/10.1007/s11258-011-9899-x>
12. Корнелюк Н.М., Конякін С.М. Особливості сезонного накопичення мікро-елементів (Cu, Pb, Zn, Cd) фітотомасою рослин техногенно трансформованих екотопів (на прикладі м. Черкаси). *Науково-практичний журнал «Екологічні науки»*. 2020. Вип. 28, том. 1. С. 335–343. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.1-28.54>
13. Бойко О.В., Гончар О.Ф., Гавриш О.М., Осокіна Т.Г. Формування екологічної мережі Черкаської області. *Агроекологічний журнал*. 2019. Вип. 3. С. 14–19. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2019.183463>
14. Галофіти. *Екологічний словник*. URL: <https://jak.koshachek.com/articles/galofiti-ekologichnij-slovník-enci-klopedii.html> (дата звернення 26.02.2026)
15. Денисик Г.І., Вальчук-Оркуша О.М. Класифікація і оптимізація дорожніх ландшафтів. International Scientific and Practical Conference «WORLD SCIENCE». № 8(24), Vol.2, August 2017. URL: <https://dspace.vspu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/a2b27fcb-96df-4834-9aae-17e8b74be63f/content> (дата звернення 26.02.2026)
16. Сонько С., Неженцев А. Визначення маршруту моніторингового дослідження придорожніх екосистем, що формуються вздовж автошляхів лівобережної частини Черкаської області *Актуальні проблеми формальної і неформальної освіти з моніторингу довкілля та заповідної справи* : зб. тез доповідей IV Міжнародної Інтернет-конференції (м. Харків, 18 квітня 2025 року). Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2025. С. 141-143. URL: <https://ekhnuir.karazin.ua/handle/123456789/21447> (дата звернення 26.02.2026)
17. Бурда Р.І. Принципи укладання класифікаційних схем оселищ на основі антропогенних екосистем за типами природокористування. *Біотопи (оселища) України: наукові засади їх дослідження та практичні результати інвентаризації*. (Матеріали робочого семінару. Київ, 21-22 березня 2012 року.) / за ред. Я.П.Дідуха, О.О. Кагала, Б.Г. Проця. Київ-Львів, 2012. 194 с. <https://doi.org/10.13140/2.1.1167.2000>
18. Національний каталог біотопів України / за ред. А.А. Куземко, Я.П.Дідуха, В.А.Онищенко, Я. Шеффера. Київ : ФОП Клименко Ю.Я., 2018. 442 с. URL: <https://geobot.org.ua/files/publication/1828/catalog.pdf> (дата звернення 26.02.2026)
19. Дубина Д.В., Ємельянова С.М., Дзюба Т.П., Устименко П.М., Фельбаба-Клушина М., Давидова А.О., Давидов Д.А., Тимошенко П.А., Барановський Б.О., Борсукевич Л.М., Вакаренко Л.П., Винокуров Д.С., Дацюк В.В., Єременко Н.С., Іванько І.А., Лисогор Л.П., Казарінова Г.О., Кармизова Л.О., Махиня Л.М., Пашкевич Н.А., Фіцайло Т.В., Шевера М.В., Ширяєва Д.В. Рудеральна рослинність України: синтаксономічна різноманітність і територіальна диференціація. *Чорноморський ботанічний журнал*. 2021. 17 (3). С.253–275. <https://doi.org/10.32999/ksu1990-553X/2021-17-3-5>
20. Воевода, В., Совгіра, С., & Дармофал, Е. (2025). Вплив змін клімату на біорізноманіття заповідних територій та його наслідки для економіки природоохоронних територій. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 359(6.1), 94-98. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-12>

Отримано:03.03.2026 / Переглянуто: 05.04.2026 / Прийнято: 16.04.2026 / Опубліковано:30.05.2026

<https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-05>

УДК (UDC): 502.1:556:574.5(477)

О. А. КАРАЇМ¹, 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>

О. О. БЕДУНКОВА, д-р біол. наук, проф.,
професор кафедри екології, технології захисту навколишнього середовища
та лісового господарства
e-mail: o.o.biedunkova@nuwm.edu.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4356-4124>
Національний університет водного господарства та природокористування,
вул. Соборна, 11, м. Рівне, Рівненська область, 33000, Україна

О. О. ЦЬОСЬ¹, канд. с.-г. наук, доц.,
доцент кафедри екології та охорони навколишнього середовища
e-mail: oksana.tsos@vnu.edu.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9679-9413>

З. В. ЛАВРИНЮК¹, канд. хім. наук, доц.,
доцент кафедри екології та охорони навколишнього середовища
e-mail: lavrynyuk.zoryana@vnu.edu.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1906-3330>

¹*Волинський національний університет імені Лесі Українки,*
просп. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., 43025, Україна

ОЦІНЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ РИБОГОСПОДАРСЬКИХ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ У АСПЕКТІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОСИСТЕМНИХ ПОСЛУГ

Мета. Оцінювання екологічного стану рибогосподарських водних об'єктів у аспекті забезпечення екосистемних послуг на основі аналізу ключових гідрохімічних показників і визначення їх впливу на функціонування водних екосистем.

Методи. Аналітичні, розрахункові, порівняльні, гідрохімічний аналіз, методи екологічної класифікації для оцінки якості води рибогосподарських водних об'єктів.

Результати. Оцінено екологічний стан рибогосподарської технологічної водойми в аспекті забезпечення екосистемних послуг на основі аналізу ключових гідрохімічних показників. Визначено, що більшість досліджуваних параметрів відповідає II–III класам якості води, що характеризує загалом добрий і задовільний стан водного середовища. Підтримувальні екосистемні послуги реалізуються на високому та задовільному рівнях, що зумовлено стабільністю кислотно-лужного режиму та прийнятними умовами кисневого забезпечення. Регулювальні послуги, пов'язані з процесами самоочищення та кругообігу речовин, забезпечуються переважно на задовільному рівні, що відображає помірний рівень органічного навантаження. Забезпечувальні екосистемні послуги також характеризуються задовільним рівнем, що свідчить про збереження ресурсної придатності води для рибогосподарського використання. Водночас виявлено окремі відхилення, зокрема підвищений вміст заліза загального, які можуть впливати на умови функціонування водної екосистеми. Узагальнення результатів за блоковими показниками засвідчило перехідний характер якості води між добрим і задовільним станом.

Висновки. Оцінювання екологічного стану рибогосподарських водних об'єктів через призму екосистемних послуг дозволяє поєднати характеристики якості води з аналізом функціонування водної екосистеми. Рівень екологічного стану безпосередньо визначає ефективність реалізації підтримувальних, регулювальних і забезпечувальних екосистемних послуг, а окремі гідрохімічні показники можуть виступати чинниками, що обмежують їх повноцінне функціонування. Запропонований підхід створює можливість більш комплексної оцінки стану рибогосподарських водойм та може бути використаний для вдосконалення системи моніторингу і управління водними ресурсами з урахуванням екосистемного підходу та забезпечення сталого розвитку.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: екологічний стан, індикаторне оцінювання, якість води, рибогосподарські водні об'єкти, екосистемні послуги, сталий розвиток

Як цитувати: Караїм О. А., Бедункова О. О., Цьось О. О., Лавринюк З. В. Оцінювання екологічного стану рибогосподарських водних об'єктів у аспекті забезпечення екосистемних послуг. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології.* 2026. Вип. 45. С. 55–66. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-05>

© Караїм О. А., Бедункова О. О., Цьось О. О., Лавринюк З. В., 2026



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

In cites: Karaim, O. A., Biedunkova, O. O., Tsos, O. O., Lavrynyuk, Z. V. (2026). Ecological status assessment of fishery water bodies in relation to ecosystem service provision. *Man and Environment. Issues of Neoecology*, (45), 55-66. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-05> (in Ukrainian)

Вступ

Сучасна парадигма управління водними ресурсами дедалі більше орієнтується на інтеграцію екологічних, економічних і соціальних аспектів функціонування водних екосистем. У цьому контексті особливого значення набуває концепція екосистемних послуг, яка розглядає природні системи як джерело матеріальних і нематеріальних вигод для суспільства. Відповідно до підходів Оцінки екосистем тисячоліття [1, 2], екосистемні послуги охоплюють забезпечувальні, регулювальні, підтримувальні та культурні функції, що формують основу добробуту людини та сталого розвитку [3].

Рибогосподарські водні об'єкти, зокрема ставкові екосистеми, виконують широкий спектр екосистемних функцій, серед яких ключовими є підтримання біорізноманіття, формування кормової бази гідробіонтів, регуляція гідрохімічного режиму, а також забезпечення ресурсної бази рибного господарства. Їх екологічний стан безпосередньо визначає рівень реалізації цих функцій і, відповідно, обсяг та якість наданих екосистемних послуг. Погіршення якості води, порушення гідрологічного режиму, евтрофікація та надмірне антропогенне навантаження призводять до зниження продуктивності водних екосистем і втрати їх функціональної стійкості.

У сучасних наукових дослідженнях, зокрема в межах підходів IPBES, екологічний стан водних об'єктів розглядається не лише як характеристика якості середовища, але і як інтегральний показник здатності екосистем забезпечувати екосистемні послуги [4]. Такий підхід передбачає перехід від традиційної оцінки окремих гідрохімічних чи біологічних параметрів до комплексного аналізу функціонування екосистеми та її внеску у забезпечення суспільних потреб.

У зв'язку з цим актуальним є розроблення підходів до оцінювання екологічного стану рибогосподарських водних об'єктів з урахуванням їх здатності забезпечувати екосистемні послуги. Такий підхід дозволяє більш обґрунтовано оцінити функціональну цінність водних екосистем, визначити рівень їх деградації та сформулювати науково обґру-

товані рекомендації щодо їх збереження й відновлення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Сучасні вітчизняні наукові праці із напрямку досліджуваної теми зосереджені переважно на оцінці якості води та екологічного стану рибогосподарських водойм. Зокрема, значна увага приділяється контролю гідрохімічних показників як базового інструменту забезпечення ефективного функціонування рибного господарства [5; 6; 7], а також оцінюванню структурних компонентів екосистем ставків і водойм рибогосподарського призначення [8]. У межах басейнового підходу досліджено вплив антропогенних чинників на водні екосистеми, що дозволяє визначити рівень трансформації їх природного стану та екологічну стійкість [9]. Методичну основу таких досліджень формують нормативні документи, зокрема методики екологічної оцінки якості поверхневих вод [10], а також законодавчі акти, що регулюють діяльність у сфері аквакультури та охорони водних біоресурсів [11–13].

Водночас міжнародні напрацювання демонструють значну кількість робіт присвячених дослідженню процесів очищення води в системах аквакультури, зокрема у штучних водно-болотних угіддях [14–19]. Також розглядаються сучасні технології очищення води у рибогосподарських ставках, зокрема із застосуванням фізико-хімічних методів, що сприяють зменшенню антропогенного навантаження на водні екосистеми [20]. Узагальнення сучасних підходів до функціонування аквакультури як складової екосистем представлено в оглядових роботах, де акцентується увага на взаємозв'язку між виробничими процесами, якістю води та екологічними наслідками [21]. Окремі дослідження підкреслюють роль біорізноманіття та трофічної структури у забезпеченні стабільності аквакультурних систем і підвищенні їх екологічної ефективності [22].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Попри значну кількість досліджень, більшість із них зосереджена на окремих аспектах функціонування водних екосистем – якості води, технологіях очищення або управлінні аквакультурою. Водно-

час питання інтеграції цих результатів у контексті оцінювання екологічного стану рибогосподарських водних об'єктів через призму екосистемних послуг залишається недостатньо розробленим. Зокрема, потребує подальшого дослідження встановлення взаємозв'язків між гідрохімічними показниками та здатністю водних екосистем забезпечувати регу-

Об'єкти та методи дослідження

Об'єктом дослідження слугувала рибогосподарська технологічна водойма площею водного дзеркала 143,2258 га, яка знаходиться поблизу села Градиськ (за межами населених пунктів), Маневицької селищної громади, Камінь-Каширського району, Волинської області. Територія її розташування характеризується переважно рівнинним рельєфом, поширенням дерново-підзолистих ґрунтів, підвищеним рівнем зволоження та розвинутою мережею малих водотоків і меліоративних каналів. Досліджувана місцевість належить до поліської природної зони, що зумовлює специфіку гідрологічного режиму водойми, зокрема помірну інтенсивність водообміну, низький рівень мінералізації та достатню природну водозабезпеченість [23].

Рибогосподарський водний об'єкт функціонує як повносистемна аквакультурна екосистема, що забезпечує повний цикл вирощування риби – від відтворення і підрощування до нагулу та отримання товарної продукції. До складу господарства входить 22 ставки, серед яких 4 нагульні (близько 80 % площі), 2 вирощувальні, 7 зимувальних і 9 нерестових, що забезпечує ефективне управління популяційною структурою гідробіонтів і безперервність виробничого процесу.

Водопостачання має комбінований характер і здійснюється за рахунок річкового стоку, підземних вод та атмосферних опадів, що формує відносно стабільний гідрологічний режим. Проточність водойми та можливість регулювання водообміну створюють умови для підтримання оптимальних гідрохімічних параметрів. Тривалість наповнення ставків становить до 3 місяців, а повний цикл їх спуску – близько 20 діб. Скидання води зі ставків здійснюється у водоскидні канали, а далі – у річку Череваху, що забезпечує контрольований водообмін і мінімізацію негативного впливу на водотоки.

Система управління водообміном дозволяє регулювати гідравлічні характеристики, запобігати замуленню та зменшувати винесення завислих речовин і біогенних

лювальні, підтримувальні та забезпечувальні послуги.

Мета: оцінювання екологічного стану рибогосподарських водних об'єктів у аспекті забезпечення екосистемних послуг на основі аналізу ключових гідрохімічних показників і визначення їх впливу на функціонування водних екосистем.

елементів у приймальні водні об'єкти. Це є важливим чинником підтримання екологічної рівноваги водної системи.

Функціонування водойми визначається комплексом екологічних і технологічних чинників, серед яких ключовими є гідрохімічні показники (вміст розчиненого кисню, сполук азоту та фосфору, рН), трофічний стан і структура біоценозу. Рибопродуктивність істотно залежить від типу господарювання: за екстенсивної технології вона становить близько 500 кг/га, тоді як за інтенсивної – до 1400 кг/га, що відповідає умовам середнього рівня інтенсифікації [23].

Таким чином, рибогосподарський водний об'єкт є природно-антропогенною екосистемою, у якій поєднання гідрологічних, гідрохімічних і технологічних параметрів визначає рівень біопродуктивності та здатність забезпечувати екосистемні послуги, зокрема забезпечувальні, що проявляються у формуванні біопродукції (рибопродуктивності), регулювальні та підтримувальні.

Оцінювання екологічного стану рибогосподарської водойми здійснювалося на основі аналізу гідрохімічних показників із використанням порівняльного методу, що передбачає зіставлення фактичних концентрацій із гранично допустимими значеннями (ГДК). Такий підхід дозволяє визначити ступінь відповідності якості водного середовища вимогам функціонування водної екосистеми.

Методичний підхід включав:

- встановлення відповідності гідрохімічних показників нормативним значенням як базового критерію екологічного стану водойми;
- виявлення відхилень і потенційних джерел забруднення як чинників, що впливають на екосистемні процеси;
- оцінку якості води рибогосподарської водойми;
- визначення рівня реалізації екосистемних послуг на основі класів якості води;
- формування висновків щодо екологічного стану водойми та її функціональної здатності забезпечувати екосистемні послуги.

Екологічна оцінка якості води виконувалася за фізико-хімічними показниками відповідно до методики екологічної класифікації поверхневих вод [10]. У межах дослідження застосовано орієнтовний тип оцінювання, що базується на разових вимірюваннях індикаторів, які відображають поточний стан водної екосистеми та рівень реалізації її функцій.

Аналіз якості води проводився за трьома групами показників, кожна з яких характеризує окремі аспекти екосистемного функціонування:

1. Сольовий блок (Іс): хлориди, сульфати, сухий залишок – показники, що визначають рівень мінералізації та ресурсну придатність води, пов'язану із забезпечувальними екосистемними послугами.

2. Трофо-сапробіологічний блок (Іт-с): розчинений кисень, ХСК, БСК₅, амонійний азот, нітрити, нітрати, фосфати, рН – показники, що характеризують інтенсивність біогеохімічних процесів, кисневий режим і трофічний стан водойми, які визначають рівень реалізації підтримувальних і регулювальних екосистемних послуг.

3. Блок специфічних речовин токсичної та радіаційної дії (Іт): залізо загальне – показник якості водного середовища, що не є безпосереднім індикатором екосистемних послуг, але впливає на умови їх реалізації, зокрема через зміну фізіологічного стану гідробіонтів.

Визначено індекс сольового складу (Іс) та індекс трофо-сапробіологічних показників (Іт-с), які дозволяють узагальнити інформацію про стан водного середовища в межах відповідних функціональних блоків. Індекс специфічних показників (Іт) не розраховувався через обмежену кількість визначених індикаторів, однак значення заліза загального враховувалося при інтерпретації результатів як чинник, що може обмежувати екосистемні процеси.

Класифікація якості води здійснювалася за п'ятьма класами (I–V) та семи категоріями (1–7), що відображають ступінь її чистоти (забрудненості):

– I клас (категорія 1) відповідає водам відмінної якості – відмінні (В)/excellent (Е), що

характеризуються як дуже чисті (ДжЧ)/very clean (VС);

– II клас (категорії 2–3) охоплює води доброї якості: дуже добрі (ДД)/very good (VГ) та добрі (Д)/good (G), які за ступенем чистоти визначаються як чисті (Ч)/clean (С) або досить чисті (ДЧ)/fairly clean (FС);

– III клас (категорії 4–5) включає води задовільної якості: задовільні (З)/satisfactory (S) та посередні (Пс)/moderate (М), що відповідають слабо забрудненим (СЗ)/slightly polluted (SP) і помірно забрудненим (ПЗ)/moderately polluted (MP) водам;

– IV клас (категорія 6) представлений водами поганої якості – погані (П)/poor (P), які характеризуються як брудні (Б)/dirty (D);

– V клас (категорія 7) відповідає водам дуже поганої якості – дуже погані (ДП)/very poor (VP), що відносяться до дуже брудних (ДБ)/very dirty (VD) [10].

Оцінювання отриманих результатів здійснювалося через призму екосистемних послуг із урахуванням функціональної ролі гідрохімічних показників у водній екосистемі. Показники розглядалися як індикатори екосистемних процесів, що забезпечують формування відповідних послуг, або як чинники, що можуть обмежувати їх реалізацію. При цьому нормативні значення відображають належний рівень функціонування екосистеми, тоді як їх перевищення свідчить про порушення екосистемних процесів і зниження здатності водойми забезпечувати екосистемні послуги.

Відповідність між гідрохімічними показниками, екосистемними процесами та типами екосистемних послуг наведено в табл. 1.

Рівень забезпечення екосистемних послуг визначався шляхом співставлення класів якості води з градацією їх реалізації: I клас – високий рівень (В)/high level (H), II – добрий (Д)/good (G), III – задовільний (З)/satisfactory (S), IV – низький (Н)/low (L), V – дуже низький (ДН)/very low (VL). Такий підхід дозволяє інтегрувати результати гідрохімічного аналізу в оцінку функціонального стану водної екосистеми та її здатності забезпечувати екосистемні послуги.

Результати дослідження та обговорення

Результати оцінювання відповідності гідрохімічних показників нормативним значенням як базового критерію екологічного стану водойми свідчать про переважну відповідність

досліджуваних параметрів вимогам до водних об'єктів рибогосподарського призначення.

У 2025 році концентрації основних біогенних сполук перебували в межах допус-

Таблиця 1

Відповідність гідрохімічних показників екосистемним процесам і типам екосистемних послуг

Table 1

Correspondence of hydrochemical indicators to ecosystem processes and types of ecosystem services

Блок /Block	Показник /Indicator	Результат вимірювання /Measurement result	Екосистемний процес /Ecosystem process	Тип екосистемної послуги /Type of ecosystem service	Роль показника /Role of the indicator
Ic	Хлориди /Chlorides	13,87 мг/дм ³	Формування сольового складу води /Formation of the salt composition of water	Забезпечувальні /Provision	Індикатор придатності води /Water suitability indicator
	Сульфати /Sulfates	22 мг/дм ³	Сірчаний цикл, мінералізація /Sulfur cycle, mineralization	Забезпечувальні /Provision	Індикатор якості води /Water quality indicator
	Сухий залишок /Dry residue	230 мг/дм ³	Загальна мінералізація /General mineralization	Забезпечувальні /Provision	Індикатор ресурсної цінності /Resource value indicator
Iг-с	Розчинений кисень /Dissolved oxygen	6,44 мгО ₂ /дм ³	Дихання, окисно-відновні процеси /Respiration, redox processes	Підтримувальні /Supporting	Індикатор функціонування /Functioning indicator
	Хімічне споживання кисню /Chemical oxygen demand	18,3 мгО ₂ /дм ³	Окиснення органічних речовин /Oxidation of organic substances	Регулювальні /Regulating	Індикатор органічного навантаження /Organic load indicator
	БСК 5 /BOD 5	2,9 мгО ₂ /дм ³	Біохімічне розкладання органіки /Biochemical decomposition of organic matter	Регулювальні /Regulating	Індикатор інтенсивності самоочищення /Self-purification intensity indicator
	Азот амонійний /Ammonium nitrogen	0,304 мг/дм ³	Мінералізація органічної речовини /Mineralization of organic matter	Регулювальні /Regulating	Індикатор трансформації азоту /Nitrogen transformation indicator
	Нітрити /Nitrites	0,023 мг/дм ³	Проміжні стадії нітрифікації /Intermediate stages of nitrification	Регулювальні /Regulating	Індикатор порушення процесів /Process disturbance indicator
	Нітрати /Nitrates	0,4 мг/дм ³	Кінцева стадія нітрифікації /Final stage of nitrification	Регулювальні /Regulating	Індикатор трофічного стану /Trophic state indicator
	Фосфати /Phosphates	0,032 мг/дм ³	Фосфорний цикл, первинна продукція /Phosphorus cycle, primary production	Регулювальні /Regulating	Індикатор евтрофікації /Eutrophication indicator
	pH	7,4	Кислотно-лужний баланс /Acid-base balance	Підтримувальні /Supporting	Індикатор стабільності середовища /Environmental stability indicator
Iг	Залізо загальне /Total iron	0,56 мг/дм ³	Геохімічні процеси, надходження з ґрунтів /Geochemical processes, input from soils	—	Індикатор якості середовища та обмежувальний чинник /Environmental quality indicator and limiting factor

мих значень: азот амонійний – 0,304 мг/дм³, нітриту – 0,023 мг/дм³, нітрата – 0,4 мг/дм³. Показники кисневого режиму також відповідали нормативам: вміст розчиненого кисню становив 6,44 мг О₂/дм³, біохімічне споживання кисню (БСК₅) – 2,9 мг О₂/дм³, хімічне споживання кисню (ХСК) – 18,3 мг О₂/дм³.

Значення показників сольового складу залишалися низькими та відповідали характерним для прісних вод умовам: хлориди – 13,87 мг/дм³, сульфати – 22 мг/дм³, сухий залишок – 230 мг/дм³. Реакція середовища була близькою до нейтральної (рН – 7,4). Концентрація фосфатів також не перевищувала нормативних значень і становила 0,032 мг/дм³.

Водночас встановлено перевищення гранично допустимої концентрації для заліза загального, вміст якого у 2025 році досягав 0,56 мг/дм³ (ГДК – 0,1/фон).

Загалом отримані результати свідчать про відповідність більшості гідрохімічних показників нормативним вимогам, за винятком окремих специфічних компонентів, що потребують подальшого аналізу та врахування при оцінці екологічного стану водойми.

Для проведення орієнтовної екологічної оцінки разові значення окремих гідрохімічних показників порівнюють із відповідними критеріями якості води [10]. Визначені класи, категорії якості води та рівень забезпечення екосистемних послуг рибогосподарської водойми наведено в табл. 2.

Результати оцінювання якості води рибогосподарської технологічної водойми за екологічною класифікацією свідчать про неоднорідний рівень її екологічного стану в межах окремих функціональних блоків, що безпосередньо відображається на рівні забезпечення екосистемних послуг.

Показники сольового складу води характеризуються переважно задовільним рівнем якості. Зокрема, концентрації хлоридів та сульфатів відповідають III класу якості води, що свідчить про помірний рівень мінералізації та задовільний стан водного середовища. Це обумовлює задовільний рівень забезпечення забезпечувальних екосистемних послуг, пов'язаних із використанням води як ресурсу.

Водночас показник сухого залишку відповідає II класу якості, що характеризує воду як відносно чисту за ступенем мінералізації та забезпечує добрий рівень реалізації забезпечувальних послуг. Така різноспрямо-

ваність показників свідчить про загалом сприятливі, але неоднорідні умови формування сольового складу води.

Блоковий індекс сольового складу води (Ic) становить 3,87, що відповідає перехідній субкатегорії між третьою та четвертою категоріями якості води. Це свідчить про переважно задовільний стан водного середовища з тенденцією до покращення до доброго рівня. За ступенем чистоти вода характеризується переходом від слабко забрудненої до досить чистої, що визначає задовільний рівень забезпечення забезпечувальних екосистемних послуг, пов'язаних із ресурсною придатністю води для рибогосподарського використання.

Що стосується трофо-сапробіологічного блоку, то оцінка показників, які характеризують біогеохімічні процеси, свідчить про загалом задовільний стан водної екосистеми з окремими ознаками підвищеного органічного навантаження.

Показники кисневого режиму демонструють стабільний, але не оптимальний стан: розчинений кисень та БСК₅ відповідають III класу якості, що вказує на задовільний рівень підтримувальних і регулювальних екосистемних послуг. Водночас ХСК відповідає II класу, що свідчить про добру здатність екосистеми до окиснення органічних речовин.

Стан азотного циклу є відносно стабільним: концентрації амонійного азоту і нітриту відповідають III класу якості, що вказує на задовільний рівень трансформаційних процесів, тоді як нітрата відносяться до II класу, що свідчить про ефективне завершення процесів нітрифікації.

Концентрація фосфатів також відповідає II класу якості, що вказує на добрий рівень регулювальних послуг та відсутність виражених ознак евтрофікації. Значення рН відповідає I класу якості, що свідчить про високий рівень стабільності середовища та оптимальні умови для існування гідробіонтів. У цілому показники цього блоку відображають задовільний рівень реалізації підтримувальних і регулювальних екосистемних послуг, із локальними ознаками покращення окремих процесів.

Блоковий індекс трофо-сапробіологічних показників (It-c) становить 3,68, що відповідає перехідному положенню між третьою та четвертою категоріями якості води.

Таблиця 2

Класи, категорії якості води та рівень забезпечення екосистемних послуг
рибогосподарської водойми, 2025 р.

Table 2

Water quality classes, categories, and the level of ecosystem service provision
in a fishery water body, 2025

Блок / Block	Показник / Indicator	Результат вимірювання / Measurement result	Категорія якості води/ Уточнена категорія / Water quality category/ Refined category	Клас якості води /Water quality class	Назва класів і категорій якості вод за їх станом / Name of water quality classes and categories by their condition	Назва класів і категорій якості вод за ступенем їх чистоти / Name of water quality classes and categories by their degree of purity	Рівень забезпечення екосистемних послуг / Level of provision of ecosystem services
Іс	Хлориди /Chlorides	13,87 мг/дм ³	4/4,32	III	3/3/ S/S	3б/С3/ Pol/SP	3/S
	Сульфати /Sulfates	22 мг/дм ³	5/5,1	III	3/Пс/ S/M	3б/П3/ Pol/MP	3/S
	Сухий залишок /Dry residue	230 мг/дм ³	2/2,2	II	Д/ДД/ G/VG	Ч/Ч/ C/C	Д/G
Іт-с	Розчинений кисень /Dissolved oxygen	6,44 мгО ₂ /дм ³	4/4,38	III	3/3/ S/S	3б/С3/ Pol/SP	3/S
	Хімічне споживання кисню /Chemical oxygen demand	18,3 мгО ₂ /дм ³	3/3,26	II	Д/Д/ G/G	Ч/ДЧ/ C/FC	Д/G
	БСК 5 / BOD 5	2,9 мгО ₂ /дм ³	4/4,39	III	3/3/ S/S	3б/С3/ Pol/SP	3/S
	Азот амонійний /Ammonium nitrogen	0,304 мг/дм ³	4/4	III	3/3/ S/S	3б/С3/ Pol/SP	3/S
	Нітрити /Nitrites	0,023 мг/дм ³	5/5,07	III	3/Пс/ S/M	3б/П3/ Pol/MP	3/S
	Нітрати /Nitrates	0,4 мг/дм ³	3/3,47	II	Д/Д/ G/G	Ч/ДЧ/ C/FC	Д/G
	Фосфати /Phosphates	0,032 мг/дм ³	3/3,05	II	Д/Д/ G/G	Ч/ДЧ/ C/FC	Д/G
	pH	7,4	1/1,83	I	В/В/ E/E	ДжЧ/ДжЧ/ VC/VC	В/Н
Іт	Залізо загальне /Total iron	0,56 мг/дм ³	5/5,12	III	3/Пс/ S/M	3б/П3/ Pol/MP	3/S

Примітка/Note: Якість вод за їх станом та чистота/ water quality & degree of purity:

I – відмінні (В)/excellent (E), дуже чисті (ДжЧ)/very clean (VC);

II – дуже добрі (ДД)/very good (VG); добрі (Д)/good (G), чисті (Ч)/clean (C), досить чисті (ДЧ)/fairly clean (FC);

III – задовільні (З)/satisfactory (S); посередні (Пс)/moderate (M); слабо забрудненим (С3)/slightly polluted (SP), помірно забрудненим (ПЗ)/moderately polluted (MP) водам;

IV – погані (П)/poor (P), брудні (Б)/dirty (D); V – дуже погані (ДП)/very poor (VP), дуже брудних (ДБ)/very dirty (VD)

Рівень забезпечення екосистемних послуг / Level of provision of ecosystem services:

I – високий рівень (В)/high level (H), II – добрий (Д)/good (G), III – задовільний (З)/satisfactory (S),

IV – низький (Н)/low (L), V – дуже низький (ДН)/very low (VL).

Отримане значення відображає задовільний стан водної екосистеми з елементами доброго функціонування окремих процесів. За ступенем чистоти вода варіює від слабо забрудненої до досить чистої, що свідчить про задовільний рівень реалізації підтримувальних і регулювальних екосистемних послуг, зокрема процесів самоочищення та біогеохімічних трансформацій.

Дослідження показника блоку специфічних речовин, показує, що концентрація заліза загального відповідає III класу якості води, що свідчить про задовільний, але обмежений стан водного середовища. З огляду на те, що залізо є показником якості середовища, його підвищений вміст може виступати чинником, який обмежує ефективність реалізації екосистемних послуг, зокрема через потенційний вплив на фізіологічний стан гідробіонтів та прозорість води.

Таким чином, результати екологічної оцінки свідчать, що рибогосподарська водойма характеризується переважно II–III класами якості води, що відповідає доброму та задовільному рівням екологічного стану. Значення блокових індексів підтверджують перехідний характер якості водного середо-

вища – від задовільного до доброго, що відображає відносну стабільність гідрохімічного режиму за наявності окремих ознак антропогенного впливу.

Сольовий склад води формує задовільний рівень забезпечення забезпечувальних екосистемних послуг, що свідчить про збереження ресурсної придатності води для рибогосподарського використання. Водночас показники трофо-сапробіологічного блоку відображають задовільний рівень реалізації підтримувальних і регулювальних екосистемних послуг, зокрема процесів самоочищення, біогеохімічного кругообігу речовин та підтримання сприятливих умов існування гідробіонтів. Разом із тим, наявність підвищених концентрацій окремих компонентів, зокрема заліза загального, свідчить про локальні обмеження якості водного середовища, які можуть впливати на ефективність реалізації екосистемних послуг.

Рибогосподарська технологічна водойма функціонує як відносно стабільна водна екосистема з переважно задовільним рівнем екологічного стану та забезпечення екосистемних послуг, що дозволяє підтримувати її рибогосподарське використання



Рис. 1 – Концептуальна модель взаємозв'язку якості води, екосистемних процесів та екосистемних послуг у рибогосподарській водоймі

Fig. 1 – Conceptual model of the relationship between water quality, ecosystem processes, and ecosystem services in a fishery water body

за умови подальшого контролю гідрохімічних показників. Для відображення взаємозв'язку між гідрохімічними показниками, екосистемними процесами та екосистемними послугами у рибогосподарській водоймі запропоновано концептуальну модель (рис. 1), що відображає послідовність формування екологічного стану водного об'єкта – від гідрологічних умов і показників якості води до екосистемних процесів, що визначають рівень реалізації екосистемних послуг та ефективність рибогосподарського використання.

Запропонована модель демонструє, що гідрохімічні показники виступають ключовими індикаторами екосистемних процесів, зокрема кисневого режиму, трансформації біогенних елементів і процесів самоочи-

щення. Інтенсивність цих процесів безпосередньо визначає рівень реалізації підтримувальних, регулювальних і забезпечувальних екосистемних послуг. Водночас антропогенний вплив (господарська діяльність, надходження забруднюючих речовин, технологічні операції в аквакультури) може змінювати гідрохімічні параметри води, що призводить до порушення екосистемних процесів і зниження ефективності екосистемних послуг.

Таким чином, якість води є визначальним чинником функціонування рибогосподарської екосистеми, оскільки через сукупність взаємопов'язаних процесів вона впливає на біопродуктивність, якість рибної продукції та загальну ефективність рибогосподарського використання водойми.

Висновки

Застосовано комплексний підхід до оцінювання якості води, який передбачає врахування не лише гідрохімічних показників, а й здатності водної екосистеми забезпечувати екосистемні послуги. Гідрохімічні показники розглянуто як індикатори екосистемних процесів, зокрема самоочищення, біогеохімічного кругообігу речовин і підтримання умов існування гідробіонтів, що дозволяє більш повно охарактеризувати функціональний стан рибогосподарських водойм.

Отримані результати підтверджують, що екологічний стан водойми безпосередньо визначає рівень реалізації забезпечувальних, регулювальних і підтримувальних екосистемних послуг. При цьому навіть незначні відхилення окремих показників можуть виступати чинниками, що обмежують ефективність функціонування екосистеми, що особливо важливо враховувати в умовах рибогосподарського використання водних об'єктів.

Застосування блокового підходу до аналізу гідрохімічних показників у поєднанні з екологічною класифікацією якості води дозволило комплексно охарактеризувати стан водойми, виявити як загальні закономірності її функціонування, так і окремі чинники, що потребують контролю. Такий підхід є зручним для практичного використання, оскільки забезпечує можливість інтерпретації результатів не лише з позицій якості води, а й через їх значення для функціонування екосистеми.

У цілому запропонована методика оцінювання може бути використана як інструмент для вдосконалення управління рибогосподарськими водними об'єктами, зокрема для своєчасного виявлення потенційних екологічних ризиків, обґрунтування природоохоронних заходів і підтримання сталого функціонування водних екосистем.

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

В роботі не використано ресурс штучного інтелекту.

Список використаної літератури

1. MAWeb.org. Ecosystems. URL: <https://maweb.org/ecosystems/>
2. Millennium Ecosystem Assessment. Overview of the Millennium Ecosystem Assessment. URL: <https://www.millenniumassessment.org/en/About.html>
3. Remme, R. P., Meacham, M., Pellowe, K. E., Andersson, E., Guerry, A. D., Janke, B., Liu, L., Lonsdorf, E., Li, M., Mao, Y., Nootenboom, C., Wu, T., & van Oudenhoven, A. P. E. 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>
4. IPBES. Global assessment report on biodiversity and ecosystem services. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. URL: <https://www.ipbes.net/global-assessment>
 5. Відділ рибальства та аквакультури (NFI). Продовольча та сільськогосподарська організація об'єднаних націй (FAO). *Офіційний сайт*. URL: <https://www.fao.org/fishery-divisional-structure/en>
 6. Галімова В. М., Калька Н. Т. Контроль якості води для ведення рибного господарства. *In The IV International Science Conference «Actual problems of practice and science»*. 2021, Ankara, Turkey. P. 19.
 7. Інститут рибного господарства НААН. Офіційний сайт. URL: <https://if.org.ua/index.php/uk/>
 8. Домбровський К. О., Єременко Т. С. Оцінка компонентів екосистеми ставка рибогосподарського призначення. *Екологічні науки*. 2023. № 6(51). С. 39–43. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.6-51.6>
 9. Караїм О. А., Караїм В. П., Бедункова О. О., Лавринюк З. В., Джам О. А. Оцінка антропогенного впливу в аспекті басейнового екологічного управління. *Вісник НУБГП. Сільськогосподарські науки* 2024. Вип. 1 (105). С. 97–119. <https://doi.org/10.31713/vs120247>
 10. 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.
 11. Про аквакультуру. Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5293-17#Text> (дата звернення 01.02.2026).
 12. Про затвердження Методичних рекомендацій з розроблення нормативів гранично допустимого скидання забруднюючих речовин у водні об'єкти із зворотними водами. Наказ Міндовкілля № 173 від 05.03.2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0173926-21#Text> (дата звернення 01.02.2026).
 13. Про рибне господарство, промислове рибальство та охорону водних біоресурсів. Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3677-17#Text> (дата звернення 01.02.2026)
 14. Deng Y, Zou M, Liu W et al. Antibiotic removal and microbial response mechanism in constructed wetlands treating aquaculture wastewater containing veterinary drugs. *J Clean Prod*. 2023. Vol. 394. Article 136271. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136271>
 15. Han Z., Guo N., Yan H. et al. Recovery of phosphate, magnesium and ammonium from eutrophic water by struvite biomineralization through free and immobilized *Bacillus cereus* MRR2. *J Clean Prod*. 2021. Vol. 320. Article 128796. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128796>
 16. Huang J., Xiao Y., Chen B. Nutrients removal by *Olivibacter jilunii* immobilized on activated carbon for aquaculture wastewater treatment: ppk1 gene and bacterial community structure. *Bioresour Technol*. 2023. Vol. 370. Article 128494. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128494>
 17. Iber B. T., Okomoda V. T., Rozaimah S. A., Kanan N. A. Eco-friendly approaches to aquaculture wastewater treatment: assessment of natural coagulants vis-a-vis chitosan. *Bioresour Technol Rep*. 2021. Vol. 15. Article 100702. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100702>
 18. Kang W., Li L., Wu S. et al. Development of a scalable electrochemical filter for removing nitrate from recirculating aquaculture saltwater. *J Clean Prod*. 2023. Vol. 391. Article 136069. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136069>
 19. Kurniawan S. B., Imron M.F., Abdullah S.R.S. et al. Coagulation–flocculation of aquaculture effluent using biobased flocculant: from artificial to real wastewater optimization by response surface methodology. *J Water Process Eng*. 2023. Vol. 53. Article 103869. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103869>
 20. Tan W. K., Cheah S. C., Parthasarathy S. et al. Fish pond water treatment using ultrasonic cavitation and advanced oxidation processes. *Chemosphere*. 2021. Vol. 274. Article 129702. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129702>
 21. Kashem A. H. M., Das P., Hawari A. H. et al. Aquaculture from inland fish cultivation to wastewater treatment: a review. *Rev Environ Sci Biotechnol*. 2023. Vol. 22. P. 969–1008. <https://doi.org/10.1007/s11157-023-09672-1>
 22. Thomas M., Pasquet A., Aubin J. et al. When more is more: taking advantage of species diversity to move towards sustainable aquaculture. *Biol Rev*. 2021. Vol. 96. P. 767–784. <https://doi.org/10.1111/brv.12677>
 23. Паспорт рибогосподарської технологічної водойми орендаря Дарчука Артема Миколайовича загальною площею водного дзеркала 143,2258 га, розташованої на території Новорудської сільської ради Манастицького району Волинської області за межами населених пунктів. Луцьк, 2019. 126 с.

Отримано:03.03.2026 / Переглянуто: 04.04.2026 / Прийнято: 10.04.2026 / Опубліковано:30.05.2026

O. A. KARAIM, PhD (Economics), Associate Prof.,
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

O. O. BIEDUNKOVA, DSc (Biology), Prof.,
Professor of the Department of Ecology, Environmental Protection Technologies and Forestry,
e-mail: o.o.biedunkova@nuwm.edu.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4356-4124>
National University of Water and Environmental Engineering,
11 Soborna St., Rivne, 33000, Ukraine

O. O. TSOS, PhD (Agricultural Sciences), Associate Prof.,
Associate Professor of the Department of Ecology and Protection of Environment,
e-mail: oksana.tsos@vnu.edu.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9679-9413>
Lesya Ukrainka Volyn National University,
13 Voli Ave., Lutsk, Volyn region, 43025, Ukraine

Z. V. LAVRYNYUK, PhD (Chemistry), Associate Prof.,
Associate Professor of the Department of Ecology and Protection of Environment,
e-mail: lavrynyuk.zoryana@vnu.edu.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1906-3330>
Lesya Ukrainka Volyn National University,
13 Voli Ave., Lutsk, Volyn region, 43025, Ukraine

ECOLOGICAL STATUS ASSESSMENT OF FISHERY WATER BODIES IN RELATION TO ECOSYSTEM SERVICE PROVISION

Purpose. To assess the ecological status of fishery water bodies in the context of ecosystem service provision based on the analysis of key hydrochemical indicators and determination of their influence on the functioning of aquatic ecosystems.

Methods. Analytical, computational, and comparative methods, hydrochemical analysis, and ecological classification methods for assessing water quality in fishery water bodies.

Results. The ecological status of a fishery technological water body was assessed in the context of ecosystem service provision based on the analysis of key hydrochemical indicators. It was found that most of the studied parameters correspond to water quality classes II–III, indicating an overall good to satisfactory condition of the aquatic environment. Supporting ecosystem services are realized at high and satisfactory levels due to the stability of the acid–base regime and adequate oxygen conditions. Regulating services related to self-purification processes and nutrient cycling are predominantly provided at a satisfactory level, reflecting a moderate level of organic loading. Provisioning ecosystem services are also characterized by a satisfactory level, indicating the preservation of water suitability for fishery use. At the same time, certain deviations were identified, particularly elevated concentrations of total iron, which may affect the functioning of the aquatic ecosystem. The generalization of results based on block indices revealed a transitional character of water quality between good and satisfactory conditions.

Conclusions. Assessing the ecological status of fishery water bodies through the lens of ecosystem services enables the integration of water quality characteristics with the analysis of ecosystem functioning. The ecological status directly determines the effectiveness of supporting, regulating, and provisioning ecosystem services, while certain hydrochemical indicators may act as limiting factors for their full realization. The proposed approach provides an opportunity for a more comprehensive assessment of fishery water bodies and can be used to improve monitoring systems and water resource management based on the ecosystem approach and principles of sustainable development.

KEYWORDS: *ecological status, water quality, fishery water bodies, ecosystem services, sustainable development*

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

In this study, generative artificial intelligence was not used.

References

1. MAWeb.org. Ecosystems. Retrieved from <https://maweb.org/ecosystems/>
2. Millennium Ecosystem Assessment. (n.d.). Overview of the Millennium Ecosystem Assessment. Retrieved from <https://www.millenniumassessment.org/en/About.html>
3. Remme, R. P., Meacham, M., Pellowe, K. E., Andersson, E., Guerry, A. D., Janke, B., Liu, L., Lonsdorf, E., Li, M., Mao, Y., Nootenboom, C., Wu, T., & van Oudenhoven, A. P. E. (2024). Aligning nature-based solutions with ecosystem services in the urban century. *Ecosystem Services*, 66, 101610. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2024.101610>
4. IPBES. Global assessment report on biodiversity and ecosystem services. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Retrieved from <https://www.ipbes.net/global-assessment>
5. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Fisheries and aquaculture division. Retrieved from <https://www.fao.org/fishery-divisional-structure/en>
6. Halimova, V. M., & Kalka, N. T. (2021). Water quality control for fish farming *Proceedings of the IV International Science Conference "Actual problems of practice and science"* (p. 19). Ankara, Turkey.
7. Institute of Fisheries of the NAAS. Retrieved from <https://if.org.ua/index.php/uk/> (in Ukrainian).
8. Dombrovskiy, K. O., & Yeremenko, T. S. (2023). Assessment of ecosystem components of a fishery pond. *Ecological Sciences*, 6–51, 39–43. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.6-51.6> (in Ukrainian).
9. 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).
10. Hrytsenko, A. V., Vasenko, O. H., Vernichenko, H. A. (2012). Methodology for ecological assessment of surface water quality by relevant categories. UkrNDIEP. (in Ukrainian).
11. On aquaculture. (2012). Law of Ukraine. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5293-17#Text> (in Ukrainian).
12. On approval of Methodological recommendations for the development of standards for maximum permissible discharge of pollutants into water bodies with return waters. Order of the Ministry of Environment No. 173 of 05.03.2021. (2021). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0173926-21#Text> (in Ukrainian).
13. On fisheries, industrial fishing and protection of aquatic biological resources. (2011). Law of Ukraine Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3677-17#Text> (in Ukrainian).
14. Deng, Y., Zou, M., Liu, W., et al. (2023). Antibiotic removal and microbial response mechanism in constructed wetlands treating aquaculture wastewater containing veterinary drugs. *Journal of Cleaner Production*, 394, 136271. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136271>
15. Han, Z., Guo, N., Yan, H., et al. (2021). Recovery of phosphate, magnesium and ammonium from eutrophic water by struvite biomineralization through free and immobilized *Bacillus cereus* MRR2. *Journal of Cleaner Production*, 320, 128796. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128796>
16. Huang, J., Xiao, Y., & Chen, B. (2023). Nutrients removal by *Olivibacter jilunii* immobilized on activated carbon for aquaculture wastewater treatment: ppk1 gene and bacterial community structure. *Bioresource Technology*, 370, 128494. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128494>
17. Iber, B. T., Okomoda, V. T., Rozaimah, S. A., & Kasan, N. A. (2021). Eco-friendly approaches to aquaculture wastewater treatment: Assessment of natural coagulants vis-à-vis chitosan. *Bioresource Technology Reports*, 15, 100702. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100702>
18. Kang, W., Li, L., Wu, S., et al. (2023). Development of a scalable electrochemical filter for removing nitrate from recirculating aquaculture saltwater. *Journal of Cleaner Production*, 391, 136069. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136069>
19. Kurniawan, S. B., Imron, M. F., Abdullah, S. R. S., et al. (2023). Coagulation–flocculation of aquaculture effluent using biobased flocculant: From artificial to real wastewater optimization by response surface methodology. *Journal of Water Process Engineering*, 53, 103869. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103869>
20. Tan, W. K., Cheah, S. C., Parthasarathy, S., et al. (2021). Fish pond water treatment using ultrasonic cavitation and advanced oxidation processes. *Chemosphere*, 274, 129702. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129702>
21. Kashem, A. H. M., Das, P., Hawari, A. H., et al. (2023). Aquaculture from inland fish cultivation to wastewater treatment: A review. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 22, 969–1008. <https://doi.org/10.1007/s11157-023-09672-1>
22. Thomas, M., Pasquet, A., Aubin, J., et al. (2021). When more is more: Taking advantage of species diversity to move towards sustainable aquaculture. *Biological Reviews*, 96, 767–784. <https://doi.org/10.1111/brv.12677>
23. Passport of a fishery technological reservoir (143.2258 ha) (2019). Lutsk. (in Ukrainian)

Submission received: 03.03.2026 / Revised: 04.04.2026 / Accepted: 10.04.2026 / Published: 30.05.2026

<https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-06>

УДК (UDC): 338.483:502.131(477.54)

С. І. СИСОЄВА, канд. наук з державного управління,
доцент кафедри готельного, ресторанного бізнесу і крафтових технологій
e-mail: svitlanasysoieva@gmail.com ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0790-0581>
Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця
пр. Науки, 9а, Харків, 61165, Україна

ОЦІНКА ЕКОЛОГО-ТУРИСТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ХАРКІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ В УМОВАХ БЕЗПЕКОВО-ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ ВОЄННОГО ЧАСУ

Мета. Комплексно оцінити еколого-туристичний потенціал Харківської області на основі актуального адміністративно-територіального устрою, структури природно-заповідного фонду та безпеково-екологічних обмежень воєнного часу.

Методи. Аналіз офіційних екологічних і нормативних джерел, картографічне узагальнення, нормована бальна оцінка, експертне ранжування чинників, кластеризація природно-рекреаційних територій та SWOT-аналіз.

Результати. Харківська область має значний ресурсний потенціал для розвитку екологічного, пізнавального, наукового та рекреаційного туризму, зумовлений поєднанням лісостепових і степових екосистем, річкових долин Сіверського Дінця, Осколу, Уд, Харкова та Лопані, лісових масивів, водно-болотних угідь і дендрологічних об'єктів. Оцінювання виконано за чотирма групами критеріїв: природно-екологічний потенціал, інфраструктурне забезпечення, транспортно-інформаційна доступність і безпекова доступність. Для усунення суб'єктивності розрахунків запропоновано формалізований інтегральний індекс із фіксованими вагами компонентів і шкалою 0-10 балів. Виділено п'ять еколого-туристичних кластерів: Гомільшансько-Сіверськодонецький, Слобожансько-Краснокутський дендрологічно-природоохоронний, Печенізько-Старосалтівський, Куп'янсько-Дворічансько-Борівський і Харківський приміський лісопарково-рекреаційний. Найвищий ефективно реалізований потенціал мають Харківський приміський та Гомільшансько-Сіверськодонецький кластери, тоді як Куп'янсько-Дворічансько-Борівський кластер характеризується високою природною цінністю, але критично низькою безпековою доступністю.

Висновки. Перспективи розвитку екотуризму в Харківській області визначаються не лише ресурсною привабливістю, а й рівнем екологічної реабілітації, розмінування, відновлення інфраструктури, цифрового інформування та інтеграції територіальних громад у післявоєнну модель сталого природокористування.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: екологічний туризм, Харківська область, природно-заповідний фонд, безпековий ризик, сталий розвиток, еколого-туристичний кластер

Як цитувати: Сисоєва С. І. Оцінка еколого-туристичного потенціалу Харківської області в умовах безпеково-екологічних ризиків воєнного часу. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології.* 2026. Вип. 45. С. 67–78. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-06>

In cites: Sysoieva, S. I. (2026). Assessment of the ecological and tourism potential of Kharkiv region under wartime safety and environmental risks. *Man and Environment. Issues of Neoeology*, (45), 67–78. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-06> (in Ukrainian)

Вступ

Екологічний туризм розглядається як форма природоорієнтованого використання територій, що поєднує рекреаційні потреби населення, екологічну освіту, підтримку місцевих громад і збереження біорізноманіття. У сучасних умовах він набуває значення не лише як сегмент туристичного ринку, а й інструмент сталого управління природними

територіями, особливо в регіонах із високою концентрацією об'єктів природно-заповідного фонду та чутливих екосистем [1, 2].

Для України розвиток екотуризму має подвійне значення. З одного боку, він спирається на значний природно-рекреаційний потенціал, різноманітність ландшафтів і мережу заповідних територій. З іншого боку,

територій стало залежним від безпекових, мінних, екологічних та інфраструктурних обмежень [3-5]. Тому традиційна оцінка туристичного потенціалу, яка ґрунтується лише на наявності природних ресурсів, уже не є достатньою.

Харківська область є показовим регіоном для такого типу дослідження. Вона розташована у межах лісостепової та степової природних зон, має розвинену гідрографічну мережу, значні лісові масиви, національні природні парки, регіональні ландшафтні парки, заказники, дендрологічні й садово-паркові об'єкти. Водночас область зазнала істотного впливу бойових дій, окупації окремих територій, мінування, руйнування інфраструктури та пошкодження природних комплексів [3, 6].

Об'єкти та методи дослідження

Об'єктом дослідження є природні, рекреаційні, інфраструктурні та безпекові передумови формування еколого-туристичного потенціалу Харківської області. Предметом дослідження є просторові закономірності концентрації природно-рекреаційних ресурсів, рівень їх фактичної доступності та можливості залучення до сталого екотуристичного використання.

Територіальною основою дослідження є чинний адміністративно-територіальний устрій Харківської області. Згідно з постановою Верховної Ради України № 807-ІХ та розпорядженням Кабінету Міністрів України № 725-р, область аналізується в межах укрупнених районів і територіальних громад, а не за застарілою сіткою колишніх районів [11, 12]. За даними Харківської обласної ради, до складу області входять 7 районів і 56 територіальних громад [13].

Інформаційну базу становили: Екологічний паспорт Харківської області за 2024 рік, офіційні нормативні документи щодо адміністративного устрою, реєстри та переліки територій і об'єктів природно-заповідного фонду, матеріали відкритих джерел щодо екологічних наслідків війни, а також результати експертного узагальнення щодо придатності територій до екотуристичного використання [3-6, 11-17].

Період дослідження охоплює 2021-2025 рр. Довоєнний стан використано як базовий для характеристики ресурсного потенціалу, а станом на 2024-2025 рр. враховано

наявні дослідження розвитку екологічного туризму в Україні переважно розкривають загальні передумови, проблеми та перспективи цього напрямку [7-10]. Однак для Харківської області залишається недостатньо опрацьованим питання поєднання ресурсної оцінки еколого-туристичного потенціалу з чинним адміністративно-територіальним устроєм, актуальними даними природно-заповідного фонду та безпеково-екологічними ризиками воєнного часу.

Метою є комплексна оцінка еколого-туристичного потенціалу Харківської області та визначення перспективних напрямів його розвитку з урахуванням актуального адміністративно-територіального устрою, структури природно-заповідного фонду й безпеково-екологічних обмежень воєнного часу.

вплив воєнних дій, доступності територій і пошкодження природоохоронних об'єктів. Такий підхід дає змогу відокремити ресурсний потенціал території від її фактичної придатності до безпечного туристичного використання.

Для кількісної оцінки використано інтегральний індекс еколого-туристичного потенціалу території (ЕТРІ), який розраховано за формулою:

$$ЕТРІ_j = 0,35N_j + 0,25I_j + 0,20A_j + 0,20B_j,$$

де N_j – природно-екологічний потенціал j -ї території;

I_j – інфраструктурне забезпечення;

A_j – транспортно-інформаційна доступність;

B_j – безпекова доступність.

Показник B_j не є оцінкою небезпеки: високий бал означає вищу можливість безпечного використання території, низький бал – значні обмеження через воєнні, мінні, екологічні або інфраструктурні ризики.

Кількісні показники нормувалися до шкали 0-10 балів. Для стимуляторів застосовано нормування $x' = 10(x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min})$, для дестимуляторів - $x' = 10(x_{\max} - x) / (x_{\max} - x_{\min})$. Якісні показники оцінювалися за п'ятирівневою шкалою: 0-2 бали - дуже низький рівень; 3-4 - низький; 5-6 - середній; 7-8 - високий; 9-10 - дуже високий.

Остаточні оцінки формувалися як середнє значення за групою показників із перевіркою логічної узгодженості між ресурсною цінністю, інфраструктурою і безпековою доступністю (табл. 1).

Таблиця 1

Система показників для оцінювання еколого-туристичного потенціалу Харківської області
Table 1
System of indicators for assessing the ecological and tourism potential of Kharkiv Region

Компонент /Component	Вага /Weight	Зміст показників /Indicator content	Напрямок оцінювання /Direction of assessment
Природно-екологічний потенціал (N) /Natural and ecological potential (N)	0,35	Площа та концентрація ПЗФ; ландшафтне різноманіття; наявність лісових, водно-болотних, степових і річкових екосистем; природоохоронна цінність /Area and concentration of the NRF; landscape diversity; presence of forest, wetland, steppe and river ecosystems; environmental value	Стимулятор /Stimulant
Інфраструктурне забезпечення (I) /Infrastructural provision (I)	0,25	Наявність засобів розміщення, пунктів харчування, маркованих маршрутів, візит-центрів, локальних туристичних сервісів /Availability of accommodation facilities, food points, marked routes, visitor centers, local tourist services	Стимулятор /Stimulant
Транспортно-інформаційна доступність (A) /Transport and information accessibility (A)	0,20	Автомобільна й залізнична доступність; близькість до Харкова та районних центрів; цифрове представлення маршруту; навігація /Automobile and rail accessibility; proximity to Kharkiv and district centers; digital representation of the route; navigation	Стимулятор /Stimulant
Безпекова доступність (B) /Safety accessibility (B)	0,20	Відсутність активних бойових дій, окупації, мінної небезпеки, офіційних обмежень доступу; стан інфраструктури та санітарно-екологічна безпечність /Absence of active hostilities, occupation, mine danger, official access restrictions; condition of infrastructure and sanitary and ecological safety	Стимулятор; низький бал означає високі ризики /Stimulant; low score means high risks

Дослідження спирається на сучасні підходи багатокритеріального оцінювання рекреаційного та природо-орієнтованого туризму, де поєднуються GIS-аналіз, норму-

вання критеріїв, експертне ранжування та інтегральна оцінка територіальних альтернатив [18-20].

Результати дослідження та обговорення

Актуальна природно-ресурсна база екологічного туризму. Харківська область розташована на північному сході України в межах лісостепової та степової природних зон. Площа області становить 31418,5 км². Рельєф території є хвилястою рівниною, розчленованою річковими долинами, ярами та балками.

Основною водною артерією є Сіверський Донець, до басейну якого належить більша частина території області; важливими також є річки Оскіл, Уди, Харків, Лопань, Берека, Вовча та інші водотоки [6].

Еколого-туристичний потенціал області формується завдяки поєднанню кількох типів природних ресурсів: лісових масивів,

заплавних і водно-болотних комплексів, степових ділянок, крейдяних схилів, річкових долин, дендрологічних і садово-паркових об'єктів. Саме таке поєднання створює передумови для розвитку пішохідного, пізнавального, орнітологічного, водного, наукового й освітнього екотуризму.

Головною інституційною основою екологічного туризму є природно-заповідний фонд. За Екологічним паспортом Харківської області за 2024 рік, станом на 01.01.2025 природно-заповідний фонд області налічує 247 об'єктів; загальна облікова площа становить 85446,0 га, фактична площа – 74888,2 га, або 2,4% площі області [6]. Ці показники принципово відрізняються

від неуточнених даних, що інколи наводяться у вторинних оглядових джерелах,

тому в цій статті використано саме офіційну актуалізовану структуру ПЗФ (табл. 2).

Таблиця 2

Актуалізована структура природно-заповідного фонду Харківської області станом на 01.01.2025

Table 2

Updated structure of the nature reserve fund of Kharkiv Region as of 01.01.2025

Категорія територій та об'єктів ПЗФ /Category of territories and objects of the NPF	Кількість, шт. / Number, pcs.	Площа, Га / Area, ha	Функціональне значення для екотуризму /Functional value for ecotourism
Природні та біосферні Заповідники /Nature and biosphere reserves	0	-	Не представлені в області /Not represented in the region
Національні природні парки / National nature parks	3	22 690,0	Ядра природоохоронного, наукового та освітнього туризму / Nuclei of nature conservation, scientific and educational tourism
Регіональні ландшафтні парки / Regional landscape parks	7	20 544,3	Рекреаційне використання за режиму охорони ландшафтів / Recreational use under landscape protection regime
Заказники загальнодержавного значення / Reserves of national importance	3	1 038,0	Збереження біорізноманіття і спеціалізований науково-пізнавальний туризм / Biodiversity conservation and specialized scientific and educational tourism
Заказники місцевого значення / Reserves of local importance	171	37 658,4	Локальна основа для громадських екостежок і пізнавальних маршрутів / Local basis for public eco-trails and educational routes
Пам'ятки природи місцевого значення / Natural monuments of local importance	44	645,9	Точкові об'єкти природничої Інтерпретації / Point objects of natural interpretation
Заповідні урочища / Reserved tracts	9	2 537,2	Охорона цінних природних комплексів і локальних екосистем / Protection of valuable natural complexes and local ecosystems
Ботанічні сади / Botanical gardens	2	55,2	Освітній і науковий туризм / Educational and scientific tourism
Дендрологічні парки / Dendrological parks	2	74,3	Еколого-освітній і культурно-пізнавальний туризм / Ecological, educational and cultural and educational tourism
Зоологічні парки / Zoological parks	1	22,0	Освітня та природоохоронна функція / Educational and environmental function
Парки-пам'ятки садово-паркового мистецтва / Parks-monuments of landscape art	5	180,7	Культурно-ландшафтний туризм / Cultural and landscape tourism
Разом, облікова площа / Total, registered area	247	85 446,0	Сукупна мережа природоохоронних територій області / Total network of nature conservation territories of the region
Фактична площа ПЗФ / Actual area of the NPF	247	74 888,2	2,4% площі адміністративно-територіальної одиниці /2.4% of the area of the administrative-territorial unit

Джерело: складено за даними Екологічного паспорта Харківської області за 2024 рік [6].

Структура ПЗФ підтверджує, що область не має природних заповідників, однак має три національні природні парки, сім регіональних ландшафтних парків і значну кількість заказників місцевого значення. Це суттєво змінює інтерпретацію туристичного

потенціалу: ключовим ресурсом є не окремий «еталонний» заповідник, а мережа природоохоронних територій різного режиму, які можуть бути об'єднані в тематичні маршрути, екологічні стежки та освітні програми (табл. 3).

Таблиця 3

Функціональна типологія природних ресурсів для екологічного туризму

Table 3

Functional typology of natural resources for ecotourism

Тип ресурсу / Resource type	Приклади прояву в Харківській області / Examples of manifestation in Kharkiv region	Потенційні види екотуризму / Potential types of ecotourism	Основні обмеження / Main limitations
Лісові екосистеми / Forest ecosystems	Дубові, соснові та байрачні ліси; Гомільшанські ліси; приміські лісопаркові масиви / Oak, pine and birch forests; Gomilshan forests; suburban forest-park areas	Пішохідний, оздоровчий, освітній, фото-туризм / Hiking, health, educational, photo-tourism	Пожежна небезпека, мінування, пошкодження лісової інфраструктури / Fire hazard, mining, damage to forest infrastructure
Річкові долини / River valleys	Сіверський Донець, Оскіл, Уди, Харків, Лопань / Siverskyi Donets, Oskil, Udy, Kharkiv, Lopan	Водний, пізнавальний, ландшафтний / Water, cognitive, landscape	Забруднення вод, руйнування мостів, обмеження доступу / Water pollution, bridge destruction, access restrictions
Водно-болотні угіддя / Wetlands	Заплави, стариці, прибережні комплекси / Flood plains, old-growth forests, coastal complexes	Орнітологічний, науковий, освітній / Ornithological, scientific, educational	Сезонність, чутливість біотопів, санітарні Ризики / Seasonality, habitat sensitivity, sanitary risks
Степові та лучно-степові ділянки / Steppe and meadow-steppe areas	Балки, схили, ділянки цілинної та напівприродної рослинності / Gibs, slopes, areas of virgin and semi-natural vegetation	Ботанічний, освітній, фото-туризм / Botanical, educational, photo-tourism	Випалювання, розорювання, військово пошкодження ґрунтів / Burning, plowing, military damage to soils
Дендрологічні та садово-паркові об'єкти / Dendrological and garden-park objects	Краснокутський дендропарк, парки-пам'ятки / Krasnokutsky Arboretum, parks-monuments	Культурно-пізнавальний, освітній, науковий / Cultural and cognitive, educational, scientific	Потреба в утриманні, відновленні й цифровій інтерпретації / Need for maintenance, restoration and digital interpretation

Кластерна модель еколого-туристичного потенціалу. З урахуванням просторової концентрації природних ресурсів, ПЗФ, транспортної доступності, наявності туристичних сервісів і безпекових обмежень виділено п'ять еколого-туристичних кластерів. Кластер у цьому дослідженні розглядається не як адміністративна одиниця, а як функціонально пов'язана територія, де

природні об'єкти, маршрути, громади та інфраструктура можуть формувати спільний туристичний продукт. Такий підхід дає змогу уникнути помилки використання застарілої сітки районування. Кожен кластер співвіднесено з чинними районами та громадами, але оцінка виконується за природно-рекреаційною логікою, що є більш коректним для екологічного туризму.

Бальні оцінки кластерів визначалися шляхом нормування кількісних показників та експертного узагальнення якісних характеристик. Для природно-екологічного потенціалу враховувалися кількість і площа об'єктів ПЗФ, ландшафтна різноманітність, наявність водних, лісових, степових і дендрологічних ресурсів. Інфраструктурна складова оцінювалася за наявністю туристичних сервісів,

засобів розміщення, маркованих маршрутів і візит-центрів. Транспортно-інформаційна доступність визначалася за транспортною зв'язаністю, близькістю до центрів попиту та цифровим представленням маршрутів. Безпекова доступність оцінювалася з урахуванням даних про окупацію, активні бойові дії, мінну небезпеку, пошкодження ПЗФ та офіційні обмеження доступу (табл. 4).

Таблиця 4

Інтегральна оцінка еколого-туристичного потенціалу пріоритетних кластерів

Table 4

Integrated assessment of the ecological and tourism potential of priority clusters

Еколого-туристичний кластер /Ecological and tourist cluster	N	I	A	B	ETPI	Інтерпретація / Interpretation
Гомільшансько-Сіверськодонецький / Gomilshansko-Siversko-Donetsk	8,6	6,6	6,8	5,5	7,1	Високий ресурсний потенціал; потребує безпекової актуалізації маршрутів / High resource potential; requires safety updating of routes
Слобожансько-Краснокутський дендрологічно-природоохоронний / Slobozhansko-Krasnokutsky dendrological and nature conservation	8,2	5,8	6,1	6,5	6,8	Стабільний природоохоронний і освітній потенціал / Stable environmental and educational potential
Печенізько-Старосалтівський / Pechenizko-Starosaltivsky	7,4	5,2	5,9	3,8	5,8	Висока водно-рекреаційна цінність за суттєвих обмежень доступу / High water and recreational value with significant access restrictions
Куп'янсько-Дворічансько-Борівський / Kupyansko-Dvorichansko-Borivsky	8,8	3,5	3,2	1,5	4,9	Дуже цінний природний комплекс, але фактично непридатний для туризму під час активних бойових ризиків / Very valuable natural complex, but practically unsuitable for tourism during active combat risks
Харківський приміський лісопарково-рекреаційний / Kharkiv suburban forest park and recreational	6,4	8,0	8,4	6,2	7,2	Найвища реалізаційна спроможність завдяки інфраструктурі та близькості до споживача / Highest implementation capacity due to infrastructure and proximity to the consumer

Примітка: N – природно-екологічний потенціал; I – інфраструктура; A – транспортно-інформаційна доступність; B – безпекова доступність. ETPI розраховано за формулою, наведеною в розділі «Об'єкти та методи дослідження». Оцінки мають дослідницький характер і не замінюють офіційного висновку щодо безпечності відвідування територій.

Note: N – natural and ecological potential; I – infrastructure; A – transport and information accessibility; B – safety accessibility. ETPI is calculated according to the formula given in the section “Objects and methods of research”. The assessments are of a research nature and do not replace an official conclusion on the safety of visiting the territories.

Результати визначають, що найвищий ефективно реалізований потенціал мають території, де ресурсна привабливість поєднується з доступністю, інфраструктурою та відносно нижчим рівнем безпекових

обмежень. Саме тому Харківський приміський лісопарково-рекреаційний кластер отримав близький до найвищого індекс, попри нижчу природоохоронну унікальність порівняно з Куп'янсько-Дворічансько-Борівським

кластером. Останній має найвищу природну цінність, але через бойові дії, мінну небезпеку, руйнування інфраструктури й обмеження доступу його фактичний туристичний потенціал у воєнний період є різко зниженим.

Вплив воєнного чинника на еколого-туристичну придатність територій. Воєнний чинник є системним обмежувачем для еколого-туристичного використання Харківської області. Його вплив проявляється не лише у зменшенні туристичних потоків, а й у прямій трансформації природних територій: пожежах, механічному порушенні ґрунтів, забрудненні вод і ґрунтів, пошкодженні лісових екосистем, знищенні туристичної інфраструктури, мінній небезпеці та обмеженні доступу до заповідних об'єктів.

За Екологічним паспортом області, в окупації перебувало 103 об'єкти ПЗФ в Ізюмському, Куп'янському, Харківському та Чугуївському районах, що становить 41,7% загальної кількості об'єктів ПЗФ; 58 об'єктів перебували безпосередньо в зоні активних бойових дій. Окремо зазначено значні пошкодження РЛП «Червонооскільський» і «Фельдман-Екопарк», а також активні бойові дії на території Дворічанської селищної ради Куп'янського району, де розташований НПП «Дворічанський» [6].

Це означає, що оцінювати потенціал Харківської області лише за кількістю природних ресурсів некоректно. У воєнних умовах слід розрізняти ресурсний потенціал, тобто природну й рекреаційну цінність території, та реалізований потенціал, тобто можливість її безпечного й законного використання для екотуризму (табл. 5).

Урахування воєнного чинника змінює логіку планування екологічного туризму. У мирний час пріоритет міг би надаватися територіям із найвищою природною унікальністю. У воєнний та ранній післявоєнний періоди пріоритетність має визначатися трієдиною умовою: природна цінність – безпечна доступність – готовність місцевої інфраструктури. Забруднення водних об'єктів, пошкодження лісових екосистем або мінування не є лише чинниками «втрати привабливості»; вони створюють прямі екологічні та санітарно-безпекові ризики для населення й відвідувачів [3-5].

SWOT-аналіз розвитку екологічного туризму. SWOT-аналіз використано як якісний інструмент стратегічного узагальнення, а не як самостійну кількісну модель. Це дає змогу уникнути необґрунтованого присвоєння балів без розкриття джерел і способу

розрахунку. Фактори SWOT сформовано з урахуванням актуальних даних ПЗФ, адміністративного устрою, стану безпекової доступності та сучасних підходів до розвитку екотуризму (табл. 6).

Пріоритети післявоєнного відновлення та розвитку. Практична реалізація еколого-туристичного потенціалу Харківської області має відбуватися поетапно. На першому етапі пріоритетом повинні бути інвентаризація пошкоджених об'єктів ПЗФ, екологічне обстеження територій, перевірка мінної безпеки, оцінка санітарного стану водних об'єктів і лісових масивів. Без цього туристичне використання навіть найбільш привабливих природних територій не може вважатися сталим і безпечним. Запропонована поетапність узгоджується із загальнодержавними та регіональними пріоритетами відновлення, сталого просторового розвитку й підвищення спроможності громад [21, 22].

На другому етапі доцільно формувати мережу коротких безпечних маршрутів навколо доступних природних локацій, насамперед у Харківському приміському та Слобожансько-Краснокутському кластерах. Такі маршрути можуть виконувати рекреаційну, освітню й реабілітаційну функції для населення, не створюючи надмірного навантаження на чутливі екосистеми.

На третьому етапі, після стабілізації безпекової ситуації, можливе поступове повернення до розвитку водного, орнітологічного, ландшафтного та наукового туризму в долині Сіверського Дінця, Печенізько-Старосалтівському та Куп'янсько-Дворічансько-Борівському кластерах. Проте це має відбуватися лише після офіційного підтвердження безпеки, екологічного аудиту та відновлення управлінської спроможності природоохоронних установ.

Важливою умовою є цифровізація управління екотуризмом: створення інтерактивної карти безпечних екостежок, позначення заборонених або обмежених територій, розміщення інформації про стан маршрутів, правила поведінки, сезонні обмеження та контакти відповідальних служб. Такий інструмент є особливо актуальним у регіоні, де безпекова ситуація може швидко змінюватися.

Запропонована оцінка має низку обмежень. По-перше, інтегральний індекс відображає дослідницьку оцінку потенціалу, а не офіційний дозвіл на відвідування територій. Перед практичним використанням маршрутів потрібні актуальні висновки компетентних органів щодо мінної, санітарної, екологічної та інфраструктурної безпеки.

Таблиця 5

**Регіональна специфіка безпеково-екологічних обмежень еколого-туристичних кластерів
Харківської області**

Table 5

Regional specificity of safety and environmental restrictions of ecotourism clusters in Kharkiv Region

Кластер /Cluster	Ключові ризики / Key risks	Наслідки для туризму / Implications for tourism	Першочергові дії / Priority actions
Гомільшансько-Сіверськодонецький / Gomilshansko-Siversko-Donetsk	Пожежні ризики, локальні пошкодження інфраструктури, потреба в перевірці маршрутів / Fire risks, local infrastructure damage, need to check routes	Можливе обмежене відновлення коротких маршрутів після офіційного підтвердження безпеки / Limited resumption of short routes possible after official confirmation of safety	Аудит маршрутів, маркування безпечних ділянок, цифрове інформування / Route audit, marking of safe areas, digital information
Слобожансько-Краснокутський дендрологічно-природоохоронний / Slobozhansko-Krasnokutsky dendrological and nature conservation	Потреба в оновленні інформаційної інфраструктури, сезонні рекреаційні навантаження / Need to update information infrastructure, seasonal recreational loads	Перспективний для освітнього та науково-пізнавального туризму / Prospective for educational and scientific-cognitive tourism	Паспортизація екостежок, розвиток візит-центрів, лімітування навантаження / Certification of eco-trails, development of visitor centers, load limitation
Печенізько-Старосалтівський / Pechenizko-Starosaltivsky	Близькість до зон воєнного впливу, обмеження доступу, ризики для водних об'єктів / Proximity to military influence zones, access restrictions, risks to water bodies	Водний і прибережний туризм можливий лише після санітарно-екологічної та безпекової перевірки / Water and coastal tourism possible only after sanitary-ecological and safety inspection	Оцінка якості води, перевірка берегової інфраструктури, безпекова навігація / Water quality assessment, inspection of coastal infrastructure, safe navigation
Куп'янсько-Дворічансько-Борівський / Kupyansko-Dvorichansko-Borivsky	Активні бойові ризики, мінна небезпека, пошкодження ПЗФ, недоступність окремих територій / Active combat risks, mine danger, damage to the NRF, inaccessibility of certain territories	Туристичне використання в поточних умовах має бути припинене або різко обмежене / Tourist use under current conditions should be stopped or sharply limited	Розмінування, екологічна інвентаризація, відновлення природоохоронного управління / Demining, ecological inventory, restoration of environmental management
Харківський приміський лісопарково-рекреаційний / Kharkiv suburban forest park and recreational	Рекреаційне перевантаження, фрагментація зелених зон, забруднення й засмічення / Recreational overload, fragmentation of green areas, pollution and littering	Може виконувати функцію найближчої безпечної зони короткотривалого природоорієнтованого відпочинку / Can serve as the nearest safe zone for short-term nature-oriented recreation	Регулювання потоків, екоосвіта, моніторинг стану зелених зон / Flow regulation, ecological education, monitoring of the state of green zones

Таблиця 6

SWOT-матриця розвитку екологічного туризму в Харківській області

Table 6

SWOT matrix for ecotourism development in Kharkiv Region

Сильні сторони /Сильні сторони	Слабкі сторони / Слабкі сторони
Різноманітність лісостепових, степових, річкових і водно-болотних екосистем; наявність 247 об'єктів ПЗФ; три національні природні парки; близькість великого міського ринку споживачів; науково-освітній потенціал Харкова /Diversity of forest-steppe, steppe, river and wetland ecosystems; presence of 247 NPF objects; three national natural parks; proximity of a large urban consumer market; scientific and educational potential of Kharkiv	Низька частка фактичної площі ПЗФ у площі області; нерівномірність просторового розподілу ресурсів; недостатня кількість маркованих екостежок; слабе цифрове представлення маршрутів; залежність частини територій від безпекових обмежень /. Low share of the actual NPF area in the area of the region; uneven spatial distribution of resources; insufficient number of marked eco-trails; weak digital representation of routes; dependence of some territories on security restrictions.
Можливості /Opportunities	Загрози / Threats
Післявоєнна екологічна реабілітація природних територій; розвиток коротких безпечних маршрутів; інтеграція громад у туристичні продукти; створення цифрової карти екостежок; залучення міжнародних програм відновлення довкілля; розвиток наукового та освітнього туризму /Post-war ecological rehabilitation of natural areas; development of short safe routes; integration of communities into tourism products; creation of a digital map of eco-trails; involvement of international environmental restoration programs; development of scientific and educational tourism.	Мінна небезпека; повторні руйнування інфраструктури; пожежі та деградація лісових екосистем; забруднення вод і ґрунтів; неконтрольоване рекреаційне навантаження; нестача фінансування на інвентаризацію, розмінування й відновлення ПЗФ / Mine hazard; repeated destruction of infrastructure; fires and degradation of forest ecosystems; water and soil pollution; uncontrolled recreational load; lack of funding for inventory, demining, and restoration of the NPF.

По-друге, частина статистичної інформації в умовах воєнного стану має обмежену доступність або оновлюється із затримкою. Це особливо стосується стану пошкоджених природних територій, фактичної доступності окремих громад, стану туристичних об'єктів і протяжності придатних маршрутів.

Харківська область має значний еколого-туристичний потенціал, сформований поєднанням лісостепових і степових ландшафтів, річкових долин, лісових масивів, водно-болотних угідь, дендрологічних об'єктів і мережі природно-заповідного фонду.

Виділено п'ять пріоритетних кластерів: Гомільшансько-Сіверськодонецький, Слобожансько-Краснокутський дендрологічно-природоохоронний, Печенізько-Старосалтівський, Куп'янсько-Дворічансько-Борівський і Харківський приміський лісопарково-рекреаційний.

Запропонований інтегральний індекс ЕТРІ дає змогу поєднати природно-екологічну цінність, інфраструктурне забезпечення, транспортно-інформаційну та безпекову доступність. Найвищу реалізаційну спроможність у

По-третє, оцінювання безпекової доступності є часово нестабільним. Територія, яка в один період може розглядатися як відносно доступна, за зміни воєнної ситуації може стати непридатною для відвідування. Тому запропонована модель потребує регулярного оновлення.

Висновки

поточних умовах мають Харківський приміський лісопарково-рекреаційний та Гомільшансько-Сіверськодонецький кластери. Куп'янсько-Дворічансько-Борівський кластер зберігає дуже високу природну цінність, але через активні безпекові ризики його туристичне використання є тимчасово неприйнятним.

Воєнний чинник не лише зменшує туристичні потоки, а й трансформує саму структуру еколого-туристичного потенціалу. Пошкодження ПЗФ, мінна небезпека, забруднення вод і ґрунтів, лісові пожежі, руйнування інфраструктури та обмеження доступу мають розглядатися як ключові компоненти методики оцінювання.

Подальший розвиток екологічного туризму в Харківській області має ґрунтуватися на поетапній моделі: екологічна інвентари-

зація й розмінування; відновлення базової інфраструктури; паспортизація безпечних маршрутів; цифрове інформування відвідувачів;

залучення громад до управління туристичними продуктами; моніторинг рекреаційного навантаження на природні комплекси.

Конфлікт інтересів

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

Декларація про використання ШІ

Автор використовувала ChatGPT-5.1 (OpenAI, 2025) виключно для редагування мови та корекції граматики. Весь науковий контент, матеріали та висновки створені автором. Остаточний текст переглянутий та перевірений автором.

Список використаної література

1. What Is Ecotourism? The International Ecotourism Society. URL: <https://ecotourism.org/what-is-ecotourism/> (дата звернення: 30.03.2026)
2. Ecotourism and Sustainable Tourism. Global Sustainable Tourism Council. URL: <https://www.gstc.org/ecotourism/> (дата звернення: 30.03.2026)
3. Environmental Damage Assessment. United Nations Development Programme in Ukraine. URL: <https://www.undp.org/ukraine/projects/environmental-damage-assessment> (дата звернення: 30.03.2026)
4. Leal Filho W., Fedoruk M., Eustachio J. H. P. P., Splodytel A., Smaliychuk A., Szykowska-Jóźwik M. I. The environment as the first victim: The impacts of the war on the preservation areas in Ukraine. *Journal of Environmental Management*. 2024. Vol. 364. Article 121399. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121399>
5. Hartmane I., Biyashev B., Getman A., Yaroshenko O., Anisimova H. Impacts of war on Ukrainian nature. *International Journal of Environmental Studies*. 2024. Vol. 81, No. 1. P. 455-462. <https://doi.org/10.1080/00207233.2024.2314856>
6. Екологічний паспорт Харківської області за 2024 рік. Харківська обласна військова адміністрація. URL: https://kharkivoda.gov.ua/content/documents/1327/132692/Attaches/ekologichniy_pasport_2024_rik.pdf (дата звернення: 30.03.2026)
7. Глушенко А., Рудоманов Д. Розвиток екотуризму в Україні. Економічний простір. 2024. № 189. С. 119-122. <https://doi.org/10.32782/2224-6282/189-22>
8. Замула І. В., Кирилюк Д. Р. Розвиток екологічного туризму в Україні. *Економіка, управління та адміністрування*. 2023. № 2(104). С. 3-9. [https://doi.org/10.26642/ema-2023-2\(104\)-3-9](https://doi.org/10.26642/ema-2023-2(104)-3-9)
9. Нікітенко К. С. Розвиток екотуризму в Україні: потенціал та проблеми. *Таврійський науковий вісник. Серія: Економіка*. 2023. № 15. С. 259-263. <https://doi.org/10.32782/2708-0366/2023.15.32>
10. Токарева В., Горюнова К. Розвиток екотуризму в Україні: роль рекреаційних комплексів у залученні туристів та збереження екосистеми. *Економіка та суспільство*. 2025. № 71. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-71-62>
11. Про утворення та ліквідацію районів : Постанова Верховної Ради України від 17.07.2020 № 807-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/807-20> (дата звернення: 30.03.2026)
12. Про визначення адміністративних центрів та затвердження територій територіальних громад Харківської області: розпорядження Кабінету Міністрів України від 12.06.2020 № 725-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/725-2020-%D1%80> (дата звернення: 30.03.2026)
13. Адміністративний устрій Харківської області. Харківська обласна рада. URL: <https://oblrada-kharkiv.gov.ua/administrativnyi-ustrij-harkivskoyi-oblasti/> (дата звернення: 30.03.2026)
14. Природно-заповідний фонд Харківської області в розрізі територіальних громад. URL: <https://pzf.land.kiev.ua/pzf-obl-20.php> (дата звернення: 30.03.2026)
15. How Did the Russian Army Harm Ukraine's Environment in 2024? Ecoaction. 2025. URL: <https://en.ecoaction.org.ua/how-russian-army-harm-ukraine-environment2024.html> (дата звернення: 30.03.2026)
16. Перелік об'єктів природно-заповідного фонду станом на 01.01.2025 по Харківській області. Харківське обласне управління лісового та мисливського господарства. URL: <https://kharkivlis.gov.ua/perelik-obyektiv-prirodno-zapovidnogo-fondu-stanom-na-01-01-2025-po-harkivskij-oblasti/> (дата звернення: 30.03.2026)
17. Нагадуємо правила відвідування заповідних територій. Державна екологічна інспекція у Харківській області. 2025. URL: <https://www.khark.dei.gov.ua/post/888> (дата звернення: 30.03.2026)
18. Barman J., Halder S., Das J., Ali S. S., Ben Hasher F. F., Rukhsana, Zhran M. Sustainable Ecotourism Suitability Assessment Using the Intergraded TOPSIS Model in the State of Mizoram, India. *Sustainability*. 2024. Vol. 16(24). Article 11066. <https://doi.org/10.3390/su162411066>

19. Zorlu K., Dede V. Evaluation of nature-based tourism potential in protected and sensitive areas by CRITIC and PROMETHEE-GAIA methods. *International Journal of Geoheritage and Parks*. 2023. Vol. 11(3). P. 349-364. <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2023.05.004>
20. Silva S., Pinho M. Protected Areas and Nature-Based Tourism: A 30-Year Bibliometric Review. *Sustainability*. 2023. Vol. 15(15). Article 11698. <https://doi.org/10.3390/su151511698>
21. Державна стратегія регіонального розвитку на 2021-2027 роки : постанова Кабінету Міністрів України від 05.08.2020 № 695. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/695-2020-%D0%BF> (дата звернення: 30.03.2026)
22. Стратегія розвитку Харківської області на 2021-2027 роки. Харків : Харківська обласна державна адміністрація, 2020. URL: <https://kharkivoda.gov.ua> (дата звернення: 30.03.2026)

Отримано: 02.04.2026 / Переглянуто: 03.05.2026 / Прийнято: 07.05.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

S. I. SYSOIEVA, PhD (Public Administration),

Associate Professor of the Department of Hotel, Restaurant Business and Craft Technologies
e-mail - svitlanasysoieva@gmail.com ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0790-0581>

Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics
9a, Nauky Ave., Kharkiv, 61165, Ukraine

ASSESSMENT OF THE ECOLOGICAL AND TOURISM POTENTIAL OF KHARKIV REGION UNDER WARTIME SAFETY AND ENVIRONMENTAL RISKS

Purpose. To assess the ecological and tourism potential of Kharkiv Oblast using the current administrative framework, updated data on the nature reserve fund, and wartime safety and environmental restrictions.

Methods. The research applies analysis of official environmental and regulatory sources, cartographic generalization, normalized scoring, expert ranking, territorial clustering and SWOT analysis.

Results. Kharkiv Oblast has considerable potential for ecological, educational, scientific and recreational tourism due to the combination of forest-steppe and steppe ecosystems, river valleys, forests, wetlands and dendrological objects. The integrated assessment combines four components: natural and ecological potential, tourism infrastructure, transport and information accessibility, and safety accessibility. Five priority ecotourism clusters were identified: Homilshany-Siverskyi Donets, Slobozhanskyi-Krasnokutsk dendrological and nature conservation, Pechenihiy-Staryi Saltiv, Kupiansk-Dvorichna-Borova and Kharkiv suburban forest-park cluster. The highest effectively realized potential is recorded for the Kharkiv suburban and Homilshany-Siverskyi Donets clusters, while the Kupiansk-Dvorichna-Borova cluster retains very high natural value but has critically low safety accessibility under current wartime conditions.

Conclusions. The future development of ecotourism in Kharkiv Oblast depends on environmental rehabilitation, demining, infrastructure restoration, digital visitor information and integration of territorial communities into a post-war sustainable nature management model.

KEYWORDS: *ecotourism, Kharkiv Oblast, nature reserve fund, safety risk, sustainable development, ecotourism cluster*

Conflict of Interest

The author declares that there is no conflict of interest regarding the publication of this manuscript. The author fully adhered to ethical standards, including issues of plagiarism, data fabrication, and duplicate publication.

AI Statement

The author used ChatGPT-5.1 (OpenAI, 2025) exclusively for language editing and grammar correction. All scientific content, materials, and conclusions were created by the author. The final text was reviewed and verified by the author.

References

1. The International Ecotourism Society. What Is Ecotourism? Retrieved from <https://ecotourism.org/what-is-ecotourism/>
2. Global Sustainable Tourism Council. Ecotourism and Sustainable Tourism. Retrieved from <https://www.gstc.org/ecotourism/>
3. Environmental Damage Assessment. United Nations Development Programme in Ukraine. Retrieved from <https://www.undp.org/ukraine/projects/environmental-damage-assessment>
4. Leal Filho, W., Fedoruk, M., Eustachio, J. H. P. P., Splodytel, A., Smaliychuk, A., & Szykowska-Jóźwik, M. I. (2024). The environment as the first victim: The impacts of the war on the preservation areas in Ukraine. *Journal of Environmental Management*, 364, 121399. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121399>

5. Hartmane, I., Biyashev, B., Getman, A., Yaroshenko, O., & Anisimova, H. (2024). Impacts of war on Ukrainian nature. *International Journal of Environmental Studies*, 81(1), 455-462. <https://doi.org/10.1080/00207233.2024.2314856>
6. Ecological Passport of Kharkiv Oblast for 2024. Kharkiv Regional Military Administration. Retrieved from https://kharkivoda.gov.ua/content/documents/1327/132692/Attaches/ekologichniy_pasport_2024_rik.pdf (in Ukrainian)
7. Hlushchenko, A., & Rudomanov, D. (2024). Development of ecotourism in Ukraine. *Economic Space*, (189), 119-122. <https://doi.org/10.32782/2224-6282/189-22> (in Ukrainian)
8. Zamula, I. V., & Kyryliuk, D. R. (2023). Development of ecological tourism in Ukraine. *Economics, Management and Administration*, 2(104), 3-9. [https://doi.org/10.26642/ema-2023-2\(104\)-3-9](https://doi.org/10.26642/ema-2023-2(104)-3-9) (in Ukrainian)
9. Nikitenko, K. S. (2023). Development of ecotourism in Ukraine: potential and problems. *Taurida Scientific Herald. Series: Economics*, (15), 259-263. <https://doi.org/10.32782/2708-0366/2023.15.32> (in Ukrainian)
10. Tokareva V., Horiunova K. (2025). Development. of ecotourism in Ukraine: the role of recreational complexes in attracting tourists and preserving ecosystems, *Economy and Society*, (71). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-71-62> (in Ukrainian)
11. Verkhovna Rada of Ukraine. On the Formation and Liquidation of Districts: Resolution No. 807-IX of 17 July 2020. (2020). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/go/807-20> (in Ukrainian)
12. On Defining Administrative Centres and Approving Territories of Territorial Communities of Kharkiv Oblast: Order No. 725-r of 12 June 2020. (2020). Cabinet of Ministers of Ukraine. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/go/725-2020-%D1%80> (in Ukrainian)
13. Administrative Structure of Kharkiv Oblast. Kharkiv Regional Council. Retrieved from <https://oblrada-kharkiv.gov.ua/administratyvnyi-ustrij-harkivskoyi-oblasti/> (in Ukrainian)
14. Nature Reserve Fund of Kharkiv Oblast by Territorial Communities. Retrieved from <https://pzf.land.kiev.ua/pzf-obl-20.php> (in Ukrainian)
15. Ecoaction. How Did the Russian Army Harm Ukraine's Environment in 2024? (2025). Retrieved from <https://en.ecoaction.org.ua/how-russian-army-harm-ukraine-environment2024.html>
16. List of Nature Reserve Fund Objects as of 01.01.2025 in Kharkiv Oblast. (2025). Kharkiv Regional Forestry and Hunting Administration. Retrieved from <https://kharkivlis.gov.ua/perelik-obyektiv-pryrodno-zapovidnogo-fondu-stanom-na-01-01-2025-po-harkivskij-oblasti/> (in Ukrainian)
17. State Environmental Inspectorate in Kharkiv Oblast. Rules for Visiting Protected Areas. (2025). Retrieved from <https://www.khark.dei.gov.ua/post/888> (in Ukrainian)
18. Barman, J., Halder, S., Das, J., Ali, S. S., Ben Hasher, F. F., Rukhsana, Zhran M. (2024). Sustainable Ecotourism Suitability Assessment Using the Intergraded TOPSIS Model in the State of Mizoram, India. *Sustainability*, 16(24), 11066. <https://doi.org/10.3390/su162411066>
19. Zorlu, K., & Dede, V. (2023). Evaluation of nature-based tourism potential in protected and sensitive areas by CRITIC and PROMETHEE-GAIA methods. *International Journal of Geoheritage and Parks*, 11(3), 349-364. <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2023.05.004>
20. Silva, S., & Pinho, M. (2023). Protected Areas and Nature-Based Tourism: A 30-Year Bibliometric Review. *Sustainability*, 15(15), 11698. <https://doi.org/10.3390/su151511698>
21. State Strategy for Regional Development for 2021-2027. (2020). Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 695 of 5 August 2020. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/go/695-2020-%D0%BF> (in Ukrainian)
22. Development Strategy of Kharkiv Oblast for 2021-2027. (2020). Kharkiv: Kharkiv Regional State Administration. Retrieved from: <https://kharkivoda.gov.ua> (in Ukrainian)

Submission received: 02.04.2026 / Revised: 03.05.2026 / Accepted: 07.05.2026 / Published: 30.05.2026

<https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-07>

УДК (UDC): 504.4.064:528.8

В. О. МАКСИМЕНКО

аспірант кафедри екологічного моніторингу та заповідної справи
e-mail: maksymenko.vladyslav.o@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5525-2438>

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
майдан Свободи, 4, 61022, Харків, Україна

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 ім. С. Кузнеця,
пр. Науки, 9а, Харків, 61165, Україна

ДИСТАНЦІЙНЕ ОЦІНЮВАННЯ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА ПІСЛЯ РУЙНУВАННЯ ГРЕБЛІ ЗА ДАНИМИ SENTINEL-2

Мета. Виявити та охарактеризувати просторово-часову трансформацію Каховського водосховища та прилеглих ландшафтів після руйнування греблі Каховської ГЕС 6 червня 2023 року за даними дистанційного зондування Землі шляхом індикації змін відкритої водної поверхні, просторової структури осушеного ложа водосховища та ознак ранньосукцесійного заростання оголених донних відкладів у післяаварійний період.

Методи. Індексний, порівняльно-часовий, візуально-дешифрувальний та частотний аналізи даних дистанційного зондування Землі.

Результати. Інформаційною основою дослідження – малохмарні сцени Sentinel-2 MSI рівня L2A за 2023 рік, отримані через Copernicus Data Space Ecosystem. Для індикації відкритої водної поверхні розраховано NDWI, а для виявлення фотосинтетично активного рослинного покриву – NDVI. Просторово-часові зміни оцінювали шляхом зіставлення ключових часових зрізів до та після руйнування греблі Каховської ГЕС, візуального дешифрування зображень у природних кольорах і аналізу частотного розподілу значень пікселів. За даними NDWI встановлено різке скорочення та фрагментацію відкритої водної поверхні Каховського водосховища протягом перших тижнів після руйнування греблі. Суцільне водне дзеркало, характерне для передаварійного стану водосховища, трансформувалося у вузьке русло Дніпра, систему залишкових водойм і значні площі оголених донних відкладів. Аналіз NDVI за осінній період 2023 року виявив появу фотосинтетично активного рослинного покриву на частині осушеного ложа водосховища. Додатні значення NDVI та зміщення частотного розподілу пікселів у бік вегетованих поверхонь свідчать про швидке піонерне заростання ділянок, які до руйнування греблі перебували під водою.

Висновки. Руйнування Каховської ГЕС спричинило швидку перебудову гідроекосистеми нижнього Дніпра з переходом від штучного водного об'єкта до складної мозаїки руслових, болотних, лучних і оголених субстратних ділянок. Дані Sentinel-2 у поєднанні з індексами NDWI та NDVI дають змогу об'єктивно документувати такі зміни навіть за відсутності безпечного доступу до території дослідження. Виявлене ранньосукцесійне заростання осушеного ложа водосховища має неоднозначне екологічне значення: воно може свідчити про часткове відновлення заплавлених біотопів, але водночас супроводжується ризиками вторинного забруднення, пилового перенесення донних відкладів, пожежної небезпеки та неконтрольованої трансформації ландшафтів. Подальший моніторинг території потребує поєднання оптичних і радарних супутникових даних, часових рядів NDWI/NDVI та, за можливості, наземної валідації.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: Каховське водосховище, Sentinel-2, дистанційне зондування Землі, NDWI, NDVI, екосистемна трансформація

Як цитувати: Максименко В. О., Безсонний В. Л. Дистанційне оцінювання просторово-часової трансформації Каховського водосховища після руйнування греблі за даними Sentinel-2. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2026. Вип. 45. С. 79–91. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-07>

In cites: Maksymenko, V. O., & Bezsonnyi, V. L. (2026). Remote sensing assessment of the spatio-temporal transformation of the Kakhovka reservoir after dam destruction using Sentinel-2 data. *Man and Environment. Issues of Neoeology*, (45), 79–91. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-07> (in Ukrainian)

© Максименко В. О., Безсонний В. Л., 2026



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

Вступ

Річкові та водосховищні геосистеми належать до найбільш динамічних природно-антропогенних комплексів, стан яких визначається взаємодією гідрологічного режиму, рельєфу, донних відкладів, рослинного покриву, кліматичних чинників і господарського використання території. Будівництво великих гідротехнічних споруд істотно змінює природний режим річкового стоку, трансформує заплавні ландшафти, змінює умови акумуляції наносів, функціонування водних і прибережно-водних екосистем, а також характер взаємодії поверхневих і підземних вод [1, 2].

Одним із найбільш трансформованих великих річкових басейнів Європи є басейн Дніпра. Упродовж ХХ століття його русло було зарегульоване каскадом водосховищ, що суттєво змінило природний гідрологічний режим річки, структуру заплавних ландшафтів і характер природокористування в прибережних регіонах [3]. Каховське водосховище, створене у 1956 році в нижній частині Дніпра, було одним із ключових елементів цього каскаду. Воно забезпечувало регулювання стоку, зрошення, водопостачання, енергетичні та господарські функції, однак водночас спричинило затоплення значних площ природних заплав, сільськогосподарських земель і територій історичного Великого Лугу [4].

Руйнування греблі Каховської ГЕС 6 червня 2023 року стало однією з найбільших гідроекологічних катастроф у сучасній історії України. Подія призвела до різкого спрацювання водосховища, затоплення територій нижче за течією, оголення великих площ донних відкладів, порушення водопостачання, втрати водних і прибережно-водних біотопів, а також формування нових довгострокових екологічних загроз [5-8]. Наслідки цієї події охоплюють не лише гідрологічний, а й геоморфологічний, ґрунтовий, біотичний, санітарно-екологічний та соціально-економічний виміри.

Особливістю дослідження наслідків руйнування Каховської ГЕС є обмежена можливість проведення традиційних польових спостережень. Значна частина території колишнього водосховища та прилеглих ландшафтів перебуває в зоні впливу бойових дій, мінної небезпеки та обмеженого доступу. За таких умов дистанційне зондування Землі набуває особливого значення як безпечний, оперативний і відтворюваний інструмент екологічного моніторингу. Супутникові дані дають

змогу оцінювати просторовий масштаб змін, порівнювати стан території у різні часові періоди, фіксувати динаміку відкритої водної поверхні, оголених субстратів і рослинного покриву без безпосереднього перебування дослідника в небезпечній зоні [9-11].

Серед відкритих супутникових місій особливе значення для моніторингу таких процесів мають дані Sentinel-2. Мультиспектральний сенсор MSI забезпечує просторову роздільність до 10 м у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах, що є достатнім для аналізу великих водних об'єктів, прибережних територій, рослинного покриву та змін земної поверхні. Відкритий доступ до архіву Sentinel-2 через Copernicus Data Space Ecosystem дає можливість здійснювати ретроспективний аналіз території до та після катастрофічної події, а також використовувати стандартизовані індексні методи для інтерпретації змін [11-13].

Для оцінювання трансформації водних і рослинних покривів найбільш поширеними є нормалізовані різниці спектральні індекси. Індекс NDWI застосовується для виявлення відкритих водних поверхонь і розмежування води та суходолу за рахунок контрасту між відбиттям у зеленому та ближньому інфрачервоному діапазонах [14]. У випадках складної межі між водою, мокрим мулом і забудованими поверхнями можуть використовуватися також модифіковані або альтернативні індекси, зокрема MNDWI та AWEI [15-17]. Індекс NDVI використовується для оцінювання наявності та інтенсивності фотосинтетично активної рослинності, що робить його придатним для виявлення рослинного покриву на осушених ділянках ложа водосховища [18].

Попри значну суспільну та наукову увагу до Каховської катастрофи, питання просторово-часової індикації трансформації ложа водосховища на основі відкритих супутникових даних залишається актуальним. Останні дослідження підтверджують значний потенціал Sentinel-2, NDWI та пов'язаних водних масок для аналізу наслідків руйнування Каховської греблі [21-26]. Водночас важливим є застосування доступної та прозорої методики, яка може бути відтворена для моніторингу інших воєнно-техногенних або гідроекологічних катастроф.

Метою є виявлення та характеристика просторово-часової трансформації Каховсь-

кого водосховища та прилеглих ландшафтів після руйнування греблі Каховської ГЕС 6 червня 2023 року за даними Sentinel-2 L2A шляхом застосування спектральних індексів NDWI і NDVI для індикації змін відкритої водної поверхні, оголених донних відкладів і рослинного покриву.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

- відібрати придатні для аналізу сцени Sentinel-2 L2A за ключові часові періоди до та після руйнування греблі;

Об'єкт та методи дослідження

Об'єктом дослідження є територія Каховського водосховища та прилеглі ландшафти нижньої течії Дніпра, що зазнали різкої трансформації після руйнування греблі Каховської ГЕС 6 червня 2023 року. До зони аналізу включено акваторію колишнього водосховища, основне русло Дніпра, залишкові водойми, оголені донні відклади та прибережні ділянки, на яких після спрацювання водосховища відбувалися зміни поверхневого покриву.

Предметом дослідження є просторово-часові зміни спектральних характеристик земної поверхні, що відображають перехід території від стану штучного водного об'єкта до мозаїки руслових, залишково-водних, оголених і вегетованих ділянок. Розглянуто дві групи змін: скорочення та фрагментація відкритої водної поверхні після руйнування греблі й формування рослинного покриву на осушених ділянках ложа водосховища в післяаварійний період.

Для аналізу використано мультиспектральні супутникові знімки Sentinel-2 MSI рівня обробки L2A, отримані через платформу Copernicus Data Space Ecosystem. Дані рівня L2A містять атмосферно скориговані значення поверхневого відбиття, що забезпечує коректніше порівняння сцен різних дат порівняно з даними рівня L1C. Для розрахунку спектральних індексів використано канали Sentinel-2 із просторовою роздільністю 10 м: зелений канал B3, червоний канал B4 та ближній інфрачервоний канал B8 [11-13].

Відбір супутникових сцен здійснювався за такими критеріями: мінімальна хмарність у межах території дослідження, відсутність значних хмарних тіней над колишньою акваторією водосховища, наявність повного покриття зони аналізу та відповідність ключовим

- розрахувати NDWI для індикації відкритої водної поверхні та оцінити просторові зміни акваторії Каховського водосховища;

- розрахувати NDVI для виявлення рослинного покриву на осушених ділянках ложа водосховища;

- проаналізувати частотний розподіл значень пікселів NDWI і NDVI для підтвердження виявлених змін;

- інтерпретувати отримані результати у контексті геоекологічних наслідків руйнування Каховської ГЕС.

етапам розвитку події. Для порівняльного аналізу використано три часові зрізи: 25 травня 2023 року - передаварійний стан; 25 червня 2023 року - післяаварійний стан на 19-й день після руйнування греблі; 3 жовтня 2023 року – осінній стан території для індикації рослинного покриву на осушених ділянках.

Для індикації відкритої водної поверхні застосовано нормалізований різницевий індекс води NDWI, запропонований S. K. McFeeters [14]. Індекс розраховувався за формулою:

$$NDWI = (\rho_{Green} - \rho_{NIR}) / (\rho_{Green} + \rho_{NIR}),$$

де ρ_{Green} – поверхневе відбиття у зеленому каналі Sentinel-2 B3,

ρ_{NIR} – поверхневе відбиття у ближньому інфрачервоному каналі Sentinel-2 B8.

Фізична основа використання NDWI полягає в тому, що відкриті водні поверхні зазвичай мають підвищене відбиття у зеленому діапазоні та низьке відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні. Унаслідок цього значення NDWI для води переважно є додатними, тоді як для ґрунтів, рослинності та штучних поверхонь вони здебільшого знижуються до нульових або від'ємних значень. У цьому дослідженні NDWI використовувався насамперед для просторової індикації відкритої водної поверхні та порівняння її конфігурації між ключовими часовими зрізами. Порогове значення $NDWI > 0$ застосовувалося як орієнтовний критерій віднесення пікселів до водної поверхні.

Для виявлення рослинного покриву на осушеному ложі водосховища використано нормалізований різницевий індекс рослинності NDVI [18]. Індекс розраховувався за формулою:

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{Red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{Red}),$$

де ρ_{NIR} – поверхневе відбиття у ближньому інфрачервоному каналі Sentinel-2 B8, ρ_{Red} – поверхневе відбиття у червоному каналі Sentinel-2 B4.

NDVI використано як індикатор наявності фотосинтетично активної рослинності. Низькі та від'ємні значення індексу інтерпретувалися як водні поверхні, оголені ґрунти, донні відклади або штучні покриття. Додатні значення NDVI вказували на наявність рослинного покриву різної щільності. У дослідженні NDVI не використовувався для визначення видового складу рослинності, а лише для просторового виявлення ділянок із фотосинтетично активним покривом. Тому отримані результати інтерпретувалися як ознаки ранньосукцесійного заростання або піонерної рослинної колонізації, а не як безпосереднє встановлення конкретних рослинних угруповань.

Через відсутність повної векторної маски досліджуваної території, власних точних площинних розрахунків і незалежної польової валідації результати NDWI та NDVI інтерпретувалися як індикативні та не розглядаються як остаточна кількісна класифікація площ води, рослинності або оголених субстратів. Основний акцент зроблено на порівнянні просторової конфігурації поверхневих класів між певними часовими зрізами.

Додатково для інтерпретації змін застосовано аналіз частотного розподілу значень пікселів NDWI і NDVI. Гістограми розподілу дозволяли оцінити зміну домінуючих спектральних характеристик поверхні між різними датами. Для передаварійного стану очікуваним є переважання значень, характерних для відкритої водної поверхні. Для післяварійного стану

– збільшення частки пікселів, що відповідають оголеному субстрату, залишковим водоймам і русловим ділянкам. Для осіннього періоду – зміщення розподілу NDVI у бік додатних значень, що свідчить про збільшення частки вегетованих поверхонь.

Інтерпретація результатів виконувалася шляхом поєднання індексного аналізу, візуального дешифрування зображень Sentinel-2 у природних кольорах та аналізу просторового розташування змінених ділянок. Результати NDWI використовувалися для оцінки втрати просторової цілісності відкритої водної поверхні та формування залишкової гідрографічної структури. Результати NDVI використовувалися для виявлення просторових проявів рослинного покриву на оголених донних відкладах.

Під час інтерпретації результатів враховувалися методичні обмеження дослідження. По-перше, використання оптичних супутникових даних залежить від хмарності, атмосферних умов і наявності хмарних тіней.

По-друге, просторової роздільності Sentinel-2 у 10 м достатньо для аналізу великомасштабних змін водосховища, але вона обмежує можливості детального дешифрування вузьких русел, дрібних залишкових водойм і мозаїчних рослинних угруповань.

По-третє, порогове виділення води за NDWI може давати похибки на ділянках мілководдя, мокрому мулу, турбідної води та змішаних пікселів у прибережній зоні.

По-четверте, NDVI є індикатором фотосинтетично активної рослинності, але не дозволяє самостійно визначити видовий склад, вік або фітоценотичну структуру рослинного покриву.

Результати дослідження

Передаварійний стан Каховського водосховища за даними Sentinel-2 від 25.05.2023. Аналіз сцени Sentinel-2 L2A від 25 травня 2023 року засвідчив, що напередодні руйнування греблі Каховської ГЕС водосховище зберігало просторову цілісність як великий штучний водний об'єкт. У візуалізації природних кольорів водна поверхня простежувалася як суцільне аквально дзеркало, що займало основну частину простору між береговими лініями та мало чітко виражену видовжену форму вздовж долини Дніпра.

Розрахунок NDWI для передаварійного знімка показав переважання додатних

значень індексу в межах акваторії водосховища. Це відповідає спектральним властивостям відкритої водної поверхні, яка характеризується відносно вищим відбиттям у зеленому каналі та низьким відбиттям у ближньому інфрачервоному діапазоні. За критерієм $NDWI > 0$ основна частина колишньої акваторії класифікувалася як водна поверхня.

Прибережні ділянки та прилеглі агроландшафти мали інші спектральні характеристики. Вони відрізнялися від акваторії нижчими або від'ємними значеннями NDWI та додатними значеннями NDVI на ділянках із рослинним покривом. У межах прибережної

смуги простежувалися локальні ділянки прибережно-водної рослинності, а на прилеглих територіях – мозаїка сільськогосподарських угідь, населених пунктів, лісосмуг і відкритих ґрунтів.

Таким чином, сцена від 25.05.2023 була використана як базовий часовий зріз, що характеризує стан водосховища до катастрофічного спрацювання. Вона дала змогу зафіксувати вихідне співвідношення основних типів поверхні: домінування відкритої водної поверхні в межах акваторії та наявність рослинного й аграрного покриття переважно за її межами.

Післяаварійна трансформація водної поверхні за даними Sentinel-2 від 25.06.2023. Сцена Sentinel-2 L2A від 25 червня 2023 року відображає стан території на 19-й день після руйнування греблі. Порівняння цього знімка з передаварійною сценою показало різку зміну просторової організації водної поверхні. Суцільне водне дзеркало, яке фіксувалося в травні 2023 року, до кінця червня було замінене мозаїкою залишкових водних ділянок, оголених донних відкладів і руслових форм (рис. 1).

NDWI-карта за 25.06.2023 виявила суттєве скорочення площі пікселів із додатними

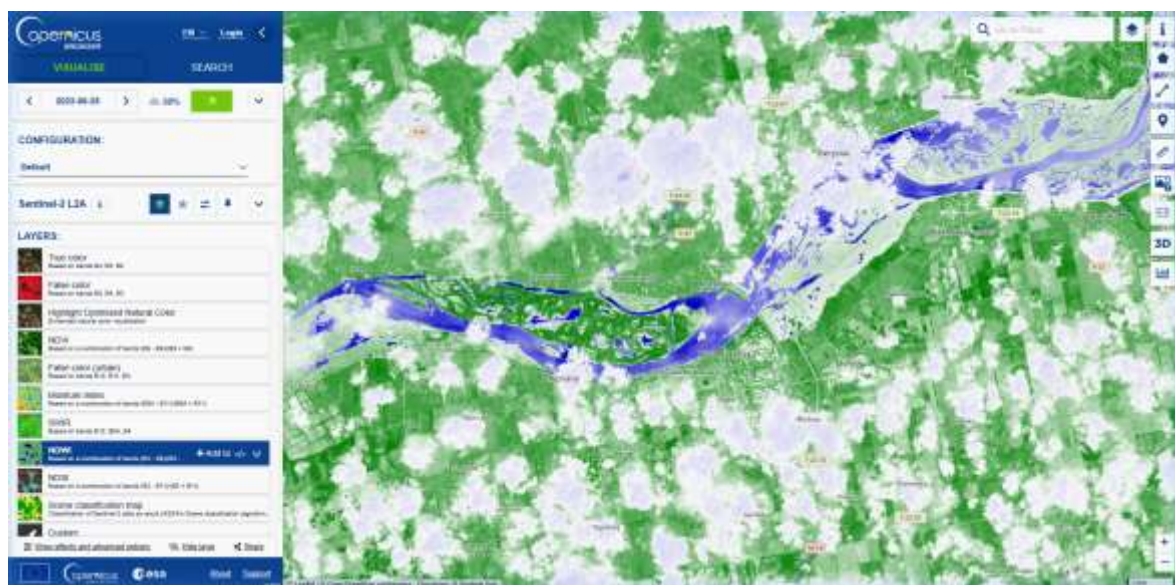


Рис. 1 – Візуалізація індексу NDWI зони Каховського водосховища після руйнування греблі, Sentinel-2 L2A, 25.06.2023: синій колір - відкрита водна поверхня, буро-сірі тони - оголені донні відклади

Fig. 1 – NDWI visualization of the Kakhovka Reservoir area after dam destruction, Sentinel-2 L2A, 25 June 2023: blue colour indicates open water surface, brown-grey tones indicate exposed bottom sediments

значеннями індексу. У межах колишньої акваторії водосховища додатні значення NDWI зберігалися переважно в межах активного русла Дніпра, залишкових водойм, понижених ділянок рельєфу та окремих фрагментів затопленої або перезволоженої поверхні. Натомість значна частина території, яка на травневому знімку класифікувалася як вода, на червневому знімку відповідала від'ємним або близьким до нуля значенням NDWI, що свідчить про оголення донних відкладів.

У просторовій структурі післяаварійного стану можна виділити кілька основних типів поверхні. Активне русло Дніпра після спрацювання водосховища зосередилося у відносно вузькій смузі, яка простежується

вздовж колишнього ложа водосховища. Окремі додатні NDWI-ділянки зафіксовано у пониженнях рельєфу колишнього дна водосховища, що відповідають залишковим водоймам, старичним формам, тальвегам колишніх приток і локальним депресіям.

Найбільшу площу в межах колишньої акваторії становили ділянки з від'ємними або близькими до нуля значеннями NDWI. У візуалізації природних кольорів вони проявлялися як світло-бурі, сірі або темно-сірі поверхні. Такі спектральні ознаки відповідають оголеним мулистим, піщаним і глинистим донним відкладами, що залишилися після швидкого відходу води. Частина території мала проміжні спектральні характеристики, що може

відповідати мокрому мулу, мілководдю, тимчасово перезволоженом поверхням або змішаним пікселям на межі води й оголеного субстрату.

Порівняння сцен 25.05.2023 та 25.06.2023 засвідчило, що основна просторова зміна полягала не лише у зменшенні відкритої водної поверхні, а й у зміні самого типу функціонування території. Водосховище як суцільний штучний водний об'єкт трансформувалося у просторово неоднорідну систему, де поєдналися русловий стік, залишкові водойми, оголені донні відклади та перезволожені ділянки.

Формування рослинного покриву на осушеному ложі водосховища восени 2023 року. Аналіз осінньої сцени Sentinel-2 L2A за 3 жовтня 2023 року показав подальшу зміну спектральних характеристик колишньої акваторії. Якщо в червні значна частина осушеного ложа водосховища відповідала оголеним донним відкладами з низькими значеннями NDVI, то восени на багатьох ділянках було зафіксовано додатні значення NDVI, характерні для фотосинтетично активної рослинності (рис. 2).

Просторовий розподіл NDVI свідчить, що рослинний покрив формувався нерівномірно. Найбільш виразні додатні значення індексу спостерігалися на ділянках із достатнім залишковим зволоженням, поблизу руслових і залишково-водних форм, а також у межах понижених частин колишнього дна. Менш виражені значення NDVI були характерні для сухіших або менш стабільних субстратів, де процес заростання відбувався повільніше або мав фрагментарний характер.

Фіксація додатних значень NDVI на території, які у травні 2023 року відповідали відкритій водній поверхні, вказує на формування фотосинтетично активного рослинного покриву на частині колишньої акваторії. Водночас ці результати не слід ототожнювати з визначенням видового складу або фітоценотичної структури рослинності. За даними одного оптичного індексу неможливо достовірно розмежувати окремі види, рослинні угруповання чи стадії сукцесії, тому зафіксовані зміни доцільно інтерпретувати як індикативні ознаки ранньосукцесійного заростання або піонерної рослинної колонізації осушених донних відкладів.

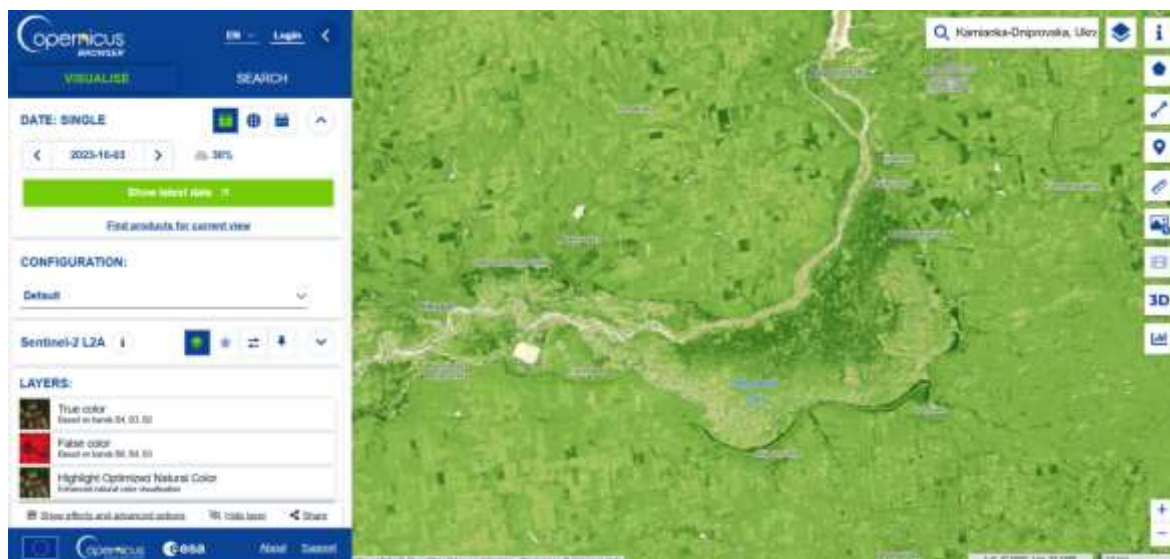


Рис. 2 – Візуалізація індексу NDVI осушеного ложа Каховського водосховища, Sentinel-2 L2A, 03.10.2023: зелені тони - ділянки з фотосинтетично активною рослинністю, буро-сірі тони – оголені або слабо вегетовані субстрати

Fig. 2 – NDVI visualization of the drained Kakhovka Reservoir bed, Sentinel-2 L2A, 3 October 2023: green tones indicate photosynthetically active vegetation, brown-grey tones indicate exposed or sparsely vegetated substrates

У просторовому відношенні вегетовані ділянки утворювали мозаїку з відкритими субстратами, залишковими водоймами та русловими формами. Така мозаїчність

відображає неоднорідність умов після спрацювання водосховища: різний гранулометричний склад донних відкладів, відмінності у зволоженні, мікрорельєфі, близькості до

джерел насінневого матеріалу та тривалості перебування поверхні без водного покриття.

Частотний аналіз значень NDVI.

Для додаткової інтерпретації змін поверхневого покриття було проаналізовано частотний розподіл значень NDVI у вибраному вікні території дослідження. Отримана гістограма для жовтневої сцени демонструє зміщення значної частини пікселів у додатний діапазон значень NDVI. Це узгоджується з появою поверхонь із фотосинтетично

активним рослинним покривом порівняно з післяварійним літнім станом (рис. 3).

Наявність пікселів із низькими або від'ємними значеннями NDVI зберігається, що відображає присутність залишкових водойм, відкритих донних відкладів, перезволожених ділянок і слабо вегетованих поверхонь. Водночас збільшення частки додатних значень NDVI вказує на те, що рослинний покрив став одним із помітних типів поверхні на осушених ділянках колишньої акваторії.

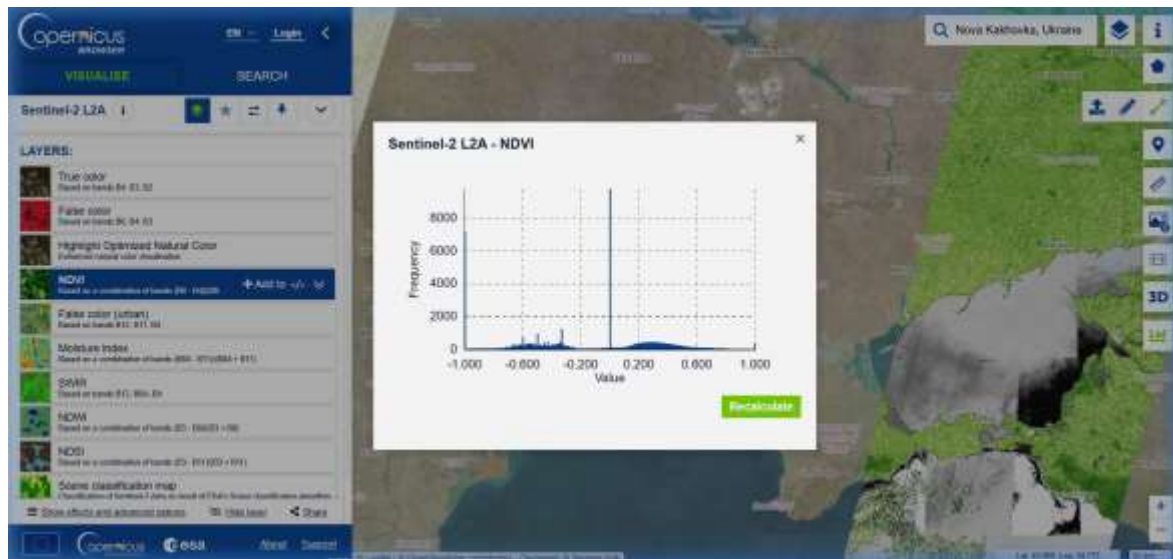


Рис. 3 – Частотний розподіл значень NDVI у вибраному вікні території дослідження, Sentinel-2 L2A, жовтень 2023 року: вісь X – значення індексу NDVI, вісь Y – частота / кількість пікселів

Fig. 3 – Frequency distribution of NDVI values within the selected study window, Sentinel-2 L2A, October 2023: X-axis indicates NDVI values, Y-axis indicates frequency / number of pixels

Гістограмний аналіз доповнює візуальне дешифрування NDVI-карт, оскільки дозволяє перейти від якісного опису «позеленіння» території до інтерпретації спектрального розподілу. Зміщення розподілу значень NDVI у додатний діапазон підтверджує, що зміни, зафіксовані на зображенні, не є лише локальним ефектом, а відображають помітну перебудову поверхневого покриття в межах досліджуваної території.

Узагальнення результатів дистанційного аналізу. Узагальнення результатів NDWI-, NDVI-аналізу та візуального дешифрування Sentinel-2 свідчить про послідовну просторово-часову трансформацію території Каховського водосховища у 2023 році. Передавній стан характеризувався домінуванням суцільної відкритої водної поверхні. Після руйнування греблі спостерігалось різке

скорочення та фрагментація водного дзеркала, формування залишкового русла Дніпра, локальних водойм і великих площ оголених донних відкладів. В осінній період частина осушеного ложа водосховища набула додатних значень NDVI, що вказує на появу фотосинтетично активного рослинного покриття.

Отримані результати мають індикативний характер і демонструють можливості відкритих даних Sentinel-2 для оперативного геоecологічного моніторингу територій, недоступних для безпечних польових досліджень.

У сукупності результати NDWI, NDVI та гістограмного аналізу підтверджують, що після руйнування греблі відбулася не лише гідрологічна зміна, пов'язана зі зникненням значної частини відкритої водної поверхні, а й ландшафтна перебудова території.

Обговорення

Отримані результати свідчать про швидку та просторово виразну трансформацію

Каховського водосховища після руйнування греблі Каховської ГЕС. Індексний аналіз

Sentinel-2 показав послідовну зміну спектрального образу території: від домінування відкритої водної поверхні у передаварійний період до фрагментації водного дзеркала, оголення донних відкладів і подальшої появи рослинного покриву на частині осушеного ложа водосховища. Така динаміка відображає не лише гідрологічну зміну, пов'язану зі спрацюванням водосховища, а й глибшу ландшафтну перебутову території [5-9].

З геоекологічної точки зору руйнування Каховської ГЕС призвело до різкої зміни функціонування нижньодніпровської геосистеми. Територія, яка протягом десятиліть існувала як велике штучне водосховище, у короткий часовий проміжок почала набувати ознак складної руслово-заплавної системи. На місці колишнього суцільного водного дзеркала сформувалася мозаїка активного русла Дніпра, залишкових водойм, перезволожених ділянок, відкритих донних відкладів і ділянок із рослинним покривом. Саме така мозаїчність є однією з головних ознак післяаварійного стану території.

Використання NDWI дало змогу простежити просторову фрагментацію відкритої водної поверхні. У передаварійний період водосховище мало цілісну просторову структуру, тоді як після руйнування греблі додатні значення NDWI зберігалися переважно в межах руслових і залишково-водних ділянок. Це вказує на перехід від режиму штучного водосховища до значно складнішої просторової конфігурації, у якій водна поверхня вже не є доміантним і суцільним елементом. Водночас слід враховувати, що NDWI є чутливим до стану поверхні й може давати неоднозначні результати на межі води, мокрого мулу, мілководдя та перезволожених донних відкладів [14-17].

Аналіз NDVI за осінній період 2023 року свідчить про появу фотосинтетично активного рослинного покриву на частині осушеного ложа водосховища. Це є важливим показником раннього етапу екологічної трансформації території. Поява додатних значень NDVI на ділянках, які до руйнування греблі перебували під водою, вказує на швидку рослинну колонізацію оголених донних відкладів. Водночас NDVI не дозволяє визначити видовий склад рослинності, її фітоценотичну структуру або стабільність сформованих угруповань [18]. Тому коректніше говорити не про повністю сформовану сукцесію, а про ранньосукцесійне заростання або піонерну рослинну колонізацію осушеного субстрату.

Імовірними чинниками швидкої появи рослинного покриву є поєднання кількох умов. По-перше, донні відклади водосховища протягом тривалого часу акумулювали органічну речовину, тонкодисперсний матеріал і поживні елементи, що могло створити сприятливий субстрат для проростання рослин. По-друге, після відходу води частина ложа водосховища зберігала підвищене зволоження, особливо у понижених ділянках, поблизу залишкових водойм і вздовж руслових форм. По-третє, джерелами насінневого матеріалу могли бути прибережні рослинні угруповання, заплавні ділянки, залишки прибережно-водної рослинності та прилеглі агроландшафти.

Разом із тим екологічне значення такого заростання є неоднозначним. З одного боку, воно може свідчити про початок стихійного відновлення окремих заплавлених або лучно-болотних біотопів, які історично були характерними для нижнього Дніпра до створення Каховського водосховища. З іншого боку, така трансформація не може оцінюватися однозначно позитивно. Оголені донні відклади можуть містити забруднювальні речовини, накопичені за десятиліття функціонування водосховища. Їх осушення, аерація, переміщення вітром або залучення до поверхневого стоку можуть створювати ризики вторинного забруднення [5, 8, 9].

Окремої уваги потребують залишкові водойми, які були зафіксовані за допомогою NDWI після спрацювання водосховища. Такі об'єкти можуть виконувати різні екологічні функції. Вони можуть бути тимчасовими осередками збереження водної біоти, джерелами вологи для прилеглих ділянок і локальними ядрами подальшої заплавної динаміки. Водночас у залишкових водоймах можливе погіршення якості води через застійні умови, підвищення температури, евтрофування, накопичення органічної речовини та контакт із забрудненими донними відкладами. Для оцінки цих процесів оптичних знімків Sentinel-2 недостатньо; потрібні додаткові дані про якість води, гідрохімічний склад, донні відклади та біоту [19].

Важливим результатом роботи є демонстрація придатності відкритих супутникових даних Sentinel-2 для оперативної індикації великих екологічних змін у зоні, недоступній для безпечних польових досліджень. Умови бойових дій, мінна небезпека та обмежений доступ до території роблять класичний наземний моніторинг фрагментарним або неможливим. У такій ситуації ДЗЗ стає не допоміжним,

а базовим джерелом просторової інформації. Sentinel-2 дозволяє порівнювати стан території у різні часові періоди, фіксувати основні напрями трансформації, виділяти водні, оголені та вегетовані ділянки, а також формувати основу для подальшого детальнішого аналізу [21-26]. До обмежень дослідження слід віднести те, що, по-перше, аналіз базується на окремих часових зрізах, а не на повному часовому ряді з високою частотою спостережень. Це обмежує можливість детального відтворення проміжних етапів спрацювання водосховища та подальшої динаміки заростання; по-друге, використання лише оптичних даних Sentinel-2 залежить від хмарності, атмосферних умов і освітлення; по-третє, просторової роздільності 10 м достатньо для загального аналізу великого водного об'єкта, але недостатньо для детальної оцінки вузьких русел, дрібних водойм, мозаїчних рослинних угруповань і локальних екотонів, по-четверте, відсутність власної польової валідації не дозволяє остаточно підтвердити видовий склад рослинності, стан донних відкладів і якість залишкових вод.

У подальших дослідженнях доцільно розширити часову базу аналізу шляхом вико-

ристання повного ряду Sentinel-2 за 2023-2025 роки. Це дозволить простежити сезонну та міжрічну динаміку рослинного покриву, стабільність залишкових водойм і можливе подальше формування заплавної біотопів. Для подолання обмежень оптичних даних доцільним буде залучити радарні знімки Sentinel-1, які можуть використовуватися незалежно від хмарності та освітлення. Перспективним є також поєднання NDWI, MNDWI, NDVI, індексів вологості, класифікації земного покриву та цифрових моделей рельєфу для точнішого розмежування води, мокрого мулу, сухих донних відкладів і рослинності.

Отримані результати мають індикативний характер, але дають змогу простежити основні напрями змін у межах колишньої акваторії Каховського водосховища. За даними Sentinel-2 встановлено скорочення відкритої водної поверхні, формування оголених ділянок ложа водосховища та появу фотосинтетично активного рослинного покриву на частині осушених територій. За умов обмеженого доступу до району дослідження такий підхід може бути використаний для подальшого спостереження за станом території.

Висновки

За результатами аналізу мультиспектральних знімків Sentinel-2 L2A встановлено, що руйнування греблі Каховської ГЕС 6 червня 2023 року спричинило швидку просторову трансформацію Каховського водосховища та прилеглих ландшафтів. Перед аварійний стан території характеризувався домінуванням суцільної відкритої водної поверхні, тоді як після руйнування греблі водне дзеркало втратило просторову цілісність і трансформувалося у мозаїку активного русла Дніпра, залишкових водойм, перезволожених ділянок і оголених донних відкладів.

Індекс NDWI виявився ефективним інструментом для дистанційної індикації змін відкритої водної поверхні. Порівняння перед аварійної та після аварійної сцен Sentinel-2 засвідчило різке скорочення й фрагментацію водної поверхні в межах колишньої акваторії. Водночас результати NDWI слід інтерпретувати як індикативні, оскільки на ділянках мілководдя, мокрого мулу, перезволожених донних відкладів і змішаних пікселів можливі класифікаційні похибки.

Аналіз NDVI за осінній період 2023 року показав появу фотосинтетично активного рослинного покриву на частині осушеного ложа Каховського водосховища, що

свідчить про початок ранньосукцесійного заростання або піонерної рослинної колонізації донних відкладів, які до руйнування греблі перебували під водою, при цьому NDVI не дозволяє визначити видовий склад рослинності, тому отримані результати потребують подальшого уточнення за допомогою польових спостережень або даних вищої просторової роздільності.

Частотний аналіз значень NDVI підтвердив загальну тенденцію до зміни спектрального образу території в осінній період: поряд із залишковими водоймами, оголеними та перезволоженими субстратами з'явилися ділянки з додатними значеннями індексу, характерними для рослинного покриву. Це узгоджується з візуальним дешифруванням супутникових знімків і свідчить про формування нової мозаїчної структури поверхневого покриву в межах колишньої акваторії.

Після аварійна трансформація Каховського водосховища має неоднозначні екологічні наслідки. З одного боку, поява рослинного покриву на осушеному ложі може бути передумовою часткового стихійного відновлення заплавної, лучних і болотних біотопів нижнього Дніпра. З іншого боку, оголення донних відкладів, можливе вторинне забруднення,

пилове перенесення, погіршення стану залишкових водойм і пожежна небезпека створюють нові екологічні ризики, що потребують тривалого моніторингу.

Відкриті дані Sentinel-2 у поєднанні з індексами NDWI та NDVI є придатним інструментом для оперативної дистанційної індикації масштабних гідроекологічних змін,

особливо в умовах, коли польові дослідження неможливі або небезпечні через бойові дії. Для подальшого підвищення точності оцінок доцільно поєднувати оптичні дані Sentinel-2 із радарними знімками Sentinel-1, часовими рядами за 2023-2025 роки, цифровими моделями рельєфу, гідрохімічними даними та наземною валідацією.

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. Автори зробили рівний внесок в це дослідження.

Декларація про використання ШІ

Автори використовували ChatGPT-5.5 (OpenAI, 2026) виключно для мовного редагування, структурного впорядкування тексту. Весь науковий контент, матеріали та висновки створені авторами. Усі наукові положення, інтерпретації, результати та висновки критично перевірені авторами, які несуть повну відповідальність за зміст рукопису.

Список використаної літератури

1. Poff N. L., Allan J. D., Bain M. B. et al. The natural flow regime. *BioScience*. 1997. Vol. 47, No. 11. P. 769-784. <https://doi.org/10.2307/1313099>
2. Tockner K., Stanford J. A. Riverine flood plains: present state and future trends. *Environmental Conservation*. 2002. Vol. 29, No. 3. P. 308-330. <https://doi.org/10.1017/S037689290200022X>
3. Афанасьев С. О. Проблеми і розвиток досліджень екологічного стану гідроекосистем України в аспекті імплементації директив ЄС в галузі довкілля. *Гідробіологічний журнал*. 2018. Т. 54, № 6. С. 3-17. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/gbj_2018_54_6_3
4. Осадчий В.І. Каховське водосховище після катастрофи: сучасний стан, виклики та стратегія відновлення (стендограма наукової доповіді на засіданні Президії НАН України 16 квітня 2025 р.). *Вісник НАН України*. 2025. № 7. С. 62-68. <https://doi.org/10.15407/visn2025.07.062>
5. United Nations Environment Programme. Rapid Environmental Assessment of Kakhovka Dam Breach, Ukraine, 2023. Nairobi: UNEP, 2023. URL: <https://www.unep.org/resources/report/rapid-environmental-assessment-kakhovka-dam-breach-ukraine-2023>
6. Shumilova O., Tockner K., Sukhodolov A., Khilchevskiy V., De Meester L., Stepanenko S., Trokhymenko G., Hernández-Agüero J. A., Gleick P. Impact of the Russia-Ukraine armed conflict on water resources and water infrastructure. *Nature Sustainability*. 2023. Vol. 6. P. 578-586. <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01068-x>
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., Sukhodolov A., Osadcha N. et al. Environmental effects of the Kakhovka Dam destruction by warfare in Ukraine. *Science*. 2025. Vol. 387, No. 6739. P. 1181-1186. <https://doi.org/10.1126/science.adn8655>
9. Oreshchenko A. Analytical materials of the Ukrainian Hydrometeorological Institute on the explosion of the Kakhovka HPP by the Russian Federation and the desiccation of the Kakhovka Reservoir. Kyiv: Ukrainian Hydrometeorological Institute, 2024. 31 p. URL: <https://uhmi.org.ua/pub/books/Kakhovka-reservoir-annual.pdf>
10. Lillesand T. M., Kiefer R. W., Chipman J. W. Remote Sensing and Image Interpretation. 7th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015. 736 p. https://www.academia.edu/165199688/Lillesand_T_Kiefer_R_W_and_Chipman_J_2015_Remote_Sensing_and_Image_Interpretation_7th_ed_John_Wiley_and_Sons_New_York
11. 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.2011.11.026>
12. Copernicus Data Space Ecosystem. Sentinel-2 Documentation. URL: <https://documentation.dataspace.copernicus.eu/Data/SentinelMissions/Sentinel2.html>
13. European Space Agency. Copernicus Browser guide. 2025. URL: https://www.esa.int/Education/Copernicus_Browser_guide

14. 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, No. 7. P. 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
15. 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, No. 14. P. 3025-3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
16. Feyisa G. L., Meilby H., Fensholt R., Proud S. R. Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*. 2014. Vol. 140. P. 23-35. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>
17. Huang C., Chen Y., Zhang S., Wu J. Detecting, extracting, and monitoring surface water from space using optical sensors: A review. *Reviews of Geophysics*. 2018. Vol. 56, No. 2. P. 333-360. <https://doi.org/10.1029/2018RG000598>
18. Tucker C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*. 1979. Vol. 8, No. 2. P. 127-150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
19. Sagan V., Peterson K. T., Maimaitijiang M. et al. Monitoring inland water quality using remote sensing: Potential and limitations of spectral indices, bio-optical simulations, machine learning, and cloud computing. *Earth-Science Reviews*. 2020. Vol. 205. Article 103187. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103187>
20. Yao F., Livneh B., Rajagopalan B. et al. Satellites reveal widespread decline in global lake water storage. *Science*. 2023. Vol. 380, No. 6646. P. 743-749. <https://doi.org/10.1126/science.abo2812>
21. Lischenko L., Filipovych V. Operational satellite geomonitring of the consequences of the destruction of the Kakhovka hydroelectric power plant dam. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*. 2024. Vol. 11, No. 1. P. 21-31. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2024.11.1.257>
22. 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, No. 4. P. 29-37. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2025.12.4.296>
23. Kozlova A., Lischenko L., Andreiev A., Lubyskiy M., Lysenko A. Water Occurrence Mapping of Kakhovka Reservoir after the Dam Destruction. *International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2024"*. 2024. P. 1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510066>
24. Sazonenko Y., Pidgorodetska L., Kolos L., Fedorov O. Analysis of spatial and temporal changes in the water surface area of the Kakhovka Reservoir based on satellite data. *International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2024"*. 2024. P. 1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510069>
25. Yang Q., Shen X., He K. et al. Pre-failure operational anomalies of the Kakhovka Dam revealed by satellite data. *Communications Earth & Environment*. 2024. Vol. 5. Article 230. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01397-5>
26. Tellman B., Sullivan J. A., Kuhn C. et al. Satellite imaging reveals increased proportion of population exposed to floods. *Nature*. 2021. Vol. 596. P. 80-86. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03695-w>

Отримано: 02.04.2026 / Переглянуто: 03.05.2026 / Прийнято: 06.05.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

V. O. MAKSYMENKO

PhD Student at the Department of Environmental Monitoring and Protected Areas Management
e-mail: maksymenko.vladyslav.o@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5525-2438>

V. N. Karazin Kharkiv National University
4, Svobody Square, 61022, Kharkiv, Ukraine

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

REMOTE SENSING ASSESSMENT OF THE SPATIO-TEMPORAL TRANSFORMATION OF THE KAKHOVKA RESERVOIR AFTER DAM DESTRUCTION USING SENTINEL-2 DATA

Purpose. To identify and characterise the spatio-temporal transformation of the Kakhovka Reservoir and adjacent landscapes after the destruction of the Kakhovka Hydroelectric Power Plant dam on 6 June 2023 using Earth remote sensing data. The study focuses on detecting changes in the open water surface, identifying the spatial structure of the exposed reservoir bed, and assessing early vegetation colonisation of drained bottom sediments

under conditions where field surveys are limited or impossible due to active hostilities, mine contamination and safety risks.

Methods. Frequency distribution analysis of pixel values and visual interpretation of natural-colour imagery were used as additional tools to support the interpretation of spectral changes.

Results. The study is based on low-cloud multispectral Sentinel-2 MSI Level-2A imagery for 2023 obtained through the Copernicus Data Space Ecosystem. The Normalized Difference Water Index was used to identify open water surfaces and assess the spatial fragmentation of the reservoir water body. The Normalized Difference Vegetation Index was applied to detect vegetation cover and evaluate early plant colonisation on the exposed reservoir bed. Key temporal scenes before and after the dam destruction were compared to determine the main stages of landscape transformation. The NDWI analysis revealed a rapid reduction and fragmentation of the open water surface of the Kakhovka Reservoir during the first weeks after the dam destruction. The continuous water body that had characterised the reservoir before the disaster was transformed into a narrow Dnipro river channel, a system of isolated residual water bodies, and extensive areas of exposed bottom sediments. The NDVI analysis for the autumn period of 2023 showed the formation of vegetation cover across part of the drained reservoir bed. Positive NDVI values and a shift in the frequency distribution of pixel values toward vegetation-covered surfaces indicate rapid pioneer vegetation colonisation of areas that had been submerged only several months earlier.

Conclusions. The destruction of the Kakhovka dam caused a rapid reorganisation of the lower Dnipro hydroecosystem, with a transition from an artificial reservoir to a complex mosaic of riverine, wetland, meadow-like and exposed substrate areas. Sentinel-2 imagery combined with NDWI and NDVI indices provides an effective, objective and reproducible tool for documenting such transformations when direct field access is restricted. The detected early vegetation colonisation of the exposed reservoir bed has ambiguous ecological implications. On the one hand, it may indicate partial spontaneous restoration of floodplain habitats similar to those that existed before the reservoir was created. On the other hand, it may be accompanied by risks of secondary pollution, dust transport from contaminated sediments, fire hazards and uncontrolled landscape transformation. Further monitoring should combine optical and radar satellite data, multi-temporal NDWI and NDVI series, and, where possible, field validation.

KEYWORDS: *Kakhovka Reservoir, Sentinel-2, Earth remote sensing, NDWI, NDVI, ecosystem transformation*

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.

In addition, the authors have fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and duplicate publication.

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

AI Statement

The authors 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. Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., ... & Stromberg, J. C. (1997). The natural flow regime. *BioScience*, 47(11), 769-784. <https://doi.org/10.2307/1313099>
2. Tockner, K., & Stanford, J. A. (2002). Riverine flood plains: Present state and future trends. *Environmental Conservation*, 29(3), 308-330. <https://doi.org/10.1017/S037689290200022X>
3. Afanasyev, S. O. (2018). Problems and development of studies of the ecological state of hydroecosystems of Ukraine in the context of implementing EU environmental directives. *Hydrobiological Journal*, 54(6), 3–17. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/gbj_2018_54_6_3
4. Osadchyi, V.I. (2025). Kakhovka Reservoir after the disaster: current status, challenges, and recovery strategy (transcript of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, April 16, 2025). *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* (7): 62-68. <https://doi.org/10.15407/visn2025.07.062>
5. United Nations Environment Programme. (2023). Rapid environmental assessment of Kakhovka Dam breach, Ukraine, 2023. UNEP. <https://www.unep.org/resources/report/rapid-environmental-assessment-kakhovka-dam-breach-ukraine-2023>
6. Shumilova, O., Tockner, K., Sukhodolov, A., Khilchevskiy, V., De Meester, L., Stepanenko, S., Trokhymenko, G., Hernández-Agüero, J. A., & Gleick, P. (2023). Impact of the Russia-Ukraine armed conflict on water resources and water infrastructure. *Nature Sustainability*, 6, 578-586. <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01068-x>

7. Spears, B. M., Harpham, Q., Brown, E., ... & Wood, M. D. (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., Sukhodolov, A., Osadcha, N., ... & Grossart, H.-P. (2025). Environmental effects of the Kakhovka Dam destruction by warfare in Ukraine. *Science*, 387(6739), 1181-1186. <https://doi.org/10.1126/science.adn8655>
9. Oreshchenko, A. (2024). Analytical materials of the Ukrainian Hydrometeorological Institute on the explosion of the Kakhovka HPP by the Russian Federation and the desiccation of the Kakhovka Reservoir. Ukrainian Hydrometeorological Institute. <https://uhmi.org.ua/pub/books/Kakhovka-reservoir-annual.pdf>
10. Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). *Remote sensing and image interpretation* (7th ed.). John Wiley & Sons. https://www.academia.edu/165199688/Lillesand_T_Kiefer_R_W_and_Chipman_J_2015_Remote_Sensing_and_Image_Interpretation_7th_ed_John_Wiley_and_Sons_New_York
11. Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., & Bargellini, P. (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.2011.11.026>
12. Copernicus Data Space Ecosystem. (n.d.). Sentinel-2 Documentation. Retrieved April 27, 2026, from <https://documentation.dataspace.copernicus.eu/Data/SentinelMissions/Sentinel2.html>
13. European Space Agency. (2025). Copernicus Browser guide. https://www.esa.int/Education/Copernicus_Browser_guide
14. 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>
15. 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>
16. Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. R. (2014). Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23-35. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>
17. Huang, C., Chen, Y., Zhang, S., & Wu, J. (2018). Detecting, extracting, and monitoring surface water from space using optical sensors: A review. *Reviews of Geophysics*, 56(2), 333-360. <https://doi.org/10.1029/2018RG000598>
18. Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127-150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
19. Sagan, V., Peterson, K. T., Maimaitjiang, M., ... & Adams, C. (2020). Monitoring inland water quality using remote sensing: Potential and limitations of spectral indices, bio-optical simulations, machine learning, and cloud computing. *Earth-Science Reviews*, 205, 103187. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103187>
20. Yao, F., Livneh, B., Rajagopalan, B., & Berge-Nguyen, M. (2023). Satellites reveal widespread decline in global lake water storage. *Science*, 380(6646), 743-749. <https://doi.org/10.1126/science.abo2812>
21. Lischenko, L., & Filipovych, V. (2024). Operational satellite geomonitoring of the consequences of the destruction of the Kakhovka hydroelectric power plant dam. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 11(1), 21-31. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2024.11.1.257>
22. 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>
23. Kozlova, A., Lischenko, L., Andreiev, A., Lubskiy, M., & Lysenko, A. (2024). Water occurrence mapping of Kakhovka Reservoir after the Dam destruction. *International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2024"*, 1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510066>
24. Sazonenko, Y., Pidgorodetska, L., Kolos, L., & Fedorov, O. (2024). Analysis of spatial and temporal changes in the water surface area of the Kakhovka Reservoir based on satellite data. *International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2024"*, 1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510069>
25. Yang, Q., Shen, X., He, K., & Anagnostou, E. N. (2024). Pre-failure operational anomalies of the Kakhovka Dam revealed by satellite data. *Communications Earth & Environment*, 5, 230. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01397-5>
26. Tellman, B., Sullivan, J. A., Kuhn, C., & Slayback, D. A. (2021). Satellite imaging reveals increased proportion of population exposed to floods. *Nature*, 596, 80-86. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03695-w>

Submission received: 02.04.2026 / Revised: 03.05.2026 / Accepted: 06.05.2026 / Published: 30.05.2026

<https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-08>

UDC: 556.551:502.4:712.253

N. V. MAKSYMENKO¹, 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>

V. V. GOLOLOBOV¹,
PhD Student of the Department of Environmental Monitoring
and Protected Areas Management
e-mail: yadim.gololobov@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-0086-0303>

I. M. KOVAL^{1,2}, DSc (Agriculture), Senior Research Fellow,
Professor of the Department of Environmental Monitoring and Protected Areas Management
e-mail: koval_iryana@ukr.net ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6328-1418>

O. O. GOLOLOBOVA¹, PhD (Agriculture),
Associate Professor of the Department of Environmental Monitoring
and Protected Areas Management
e-mail: elena.gololobova@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5558-2114>

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

²*Ukrainian Research Institute of Forestry and Agroforestry Reclamation named after G. M. Vysotsky,
86, Hryhoriya Skovorody, Str., Kharkiv, 61024, Ukraine*

LANDSCAPE-ECOLOGICAL FUNDAMENTALS TO THE REVITALIZATION OF THE POND IN THE B. F. OSTAPENKO DENDROLOGICAL PARK OF THE STATE BIOTECHNOLOGICAL UNIVERSITY

Purpose. To justify the comprehensive revitalization of the pond within the B.F. Ostapenko Arboretum of the State Biotechnology University as a nature-based solution for adapting the arboretum's ecosystem to climate change and implementing the landscape design proposed by A.D. Zhirnov.

Methods. Retrospective analysis of archival project decisions, landscape and environmental planning, digital terrain modeling, field, laboratory analytical.

Results. A retrospective analysis of archival design decisions from 1970–1971 revealed the main cause of the water body's dysfunction: the high infiltration capacity of the sandy bottom of the reservoir, which prevented natural water accumulation. A comprehensive landscape-ecological assessment of the territory was conducted, justifying the feasibility of restoring the pond through the implementation of modern engineering solutions, specifically the installation of an impervious liner based on bentonite barriers. A three-dimensional model of the pond bed was developed, incorporating a dedicated bio-plateau zone. A phytoremediation system involving oxygenating plants was proposed. The high quality of snowmelt water as a resource for filling the water body was demonstrated.

Conclusion. The landscape and ecological conditions of the area, combined with the application of modern technologies, will facilitate the restoration of the pond's aquatic-anthropogenic ecosystem. This will transform the dysfunctional territory into an active ecological hub, providing climatic moderation through the creation of a "moist oasis" and an autonomous irrigation reservoir. The implementation of the project directly contributes to the achievement of UN SDG 15.1 by ensuring the sustainable functioning of introduced species collections in the context of climate change.

KEYWORDS: *landscape and environmental planning, revitalization, arboretum, nature-oriented solutions, GIS modeling, bentonite barriers, bio-filtration area, oxygenating plants, Sustainable Development Goals*

Як цитувати: Maksymenko N. V., Gololobov V. V., Koval I. M., Gololobova O. O. Landscape-ecological fundamentals to the revitalization of the pond in the B. F. Ostapenko dendrological park of the State Biotechnological University. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2026. Вип. 45. С. 92–108. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-08>

In cites: Maksymenko N. V., Gololobov V. V., Koval I. M., Gololobova O. O. (2026). Landscape-ecological fundamentals to the revitalization of the pond in the B. F. Ostapenko dendrological park of the State Biotechnological University. *Man and Environment. Issues of Neoecology*, (45), 92–108. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-08>

© Maksymenko N. V., Gololobov V. V., Koval I. M., Gololobova O. O., 2026



This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Introduction

A distinct group of objects involved in landscape planning comprises aquatic anthropogenic systems, specifically man-made ponds, the favorable ecological status of which must be maintained by their creator — a human being. Studies by L. V. Ilyin are dedicated to the investigation of the hydrochemical and hydrobiological regimes of water bodies in Ukraine [1, 2]. In a theoretical and methodological context, the contemporary research by V. K. Khilchevskiy, M. R. Zabokrytska, et al. [3, 4] is of leading importance. The works of M. H. Shcherban, V. V. Myasoiedov, V. A. Kapustnyk, S. R. Novytska, V. K. Khilchevskiy, et al. [4, 5, 6, 7] are specifically dedicated to the evaluation of recreational water bodies.

Despite this, the ecological role of such objects and their ecosystem services are often overlooked by researchers and significantly undervalued, particularly in comparison with other types of anthropogenic activities. Although artificial reservoirs usually have a simplified environmental structure compared to their natural counterparts, they are highly valuable for supporting local biodiversity [8].

The relevance of restoring small water bodies is consistent with the strategy of the EU Water Framework Directive, which since 1996 has extended protection to all types of surface and groundwater. Today, the degradation of small water bodies and their gradual loss are recognized as a significant environmental conservation problem throughout the European Union [9, 10].

The experience of successful international nature conservation strategies is of particular importance in the context of pond restoration. A notable example is the Million Ponds Project by the Freshwater Habitats Trust, whose main goal is to overcome the effects of a century of small water body loss by restoring a network of ponds in the landscapes of Great Britain. The results of the project showed that the creation of more than 1,000 new and restored ponds between 2008 and 2012 provided habitats for about 50 rare species that are threatened with extinction [11, 12].

In the context of ecologically consistent pond restoration, the application of landscape and ecological planning is instrumental for assessing the environmental status of both the water body and its adjacent territory [13, 14, 15, 16]. It is landscape and ecological planning that enables the identification of existing land-use conflicts within the pond's zone of influence and

upon the pond itself, the prediction of their consequences, and the development of optimization measures. In contrast to other systems, additional research in these cases necessitates the modeling of dynamic rather than merely static parameters, as the water management system undergoes significant transformations throughout the year (water levels, pollutant concentrations, the intensity of conflict sources, etc.).

Water bodies, as objects of study, have a long history of research from various perspectives: hydrophysics, hydrochemistry, hydrobiology, biological productivity, etc. Undoubtedly, the scientific contributions of specialists in various fields can serve as a methodological and analytical foundation for landscape and ecological planning. At the same time, landscape and ecological planning does not aim to replace specialized research, but rather to systematize, integrate, and direct it towards solving a common task — the restoration of the water management landscape (the pond).

The dendrological park of the B. F. Ostapenko State Biotechnological University is a nature reserve, the genesis of which was based on the integration of scientific research and aesthetic planning functions. In the architectural and planning concept developed in 1970–1971 by scientists from the L'viv Forestry Institute under the leadership of A. D. Zhirnov, water components — a fountain and a decorative pond — were considered as the compositional dominant and the hub of the hydrological network [17, 18].

The foundation for spatial planning was laid by large-scale geodetic surveys (1969–1970) and soil studies conducted under the supervision of D. G. Tykhonenko, which resulted in the creation of a detailed soil map on a scale of 1:2000 [17]. However, retrospective analysis shows that the implementation of hydraulic structures became the most vulnerable link in the 1972 project due to the lack of a comprehensive water supply system and the presence of a thick sand layer, which causes high soil infiltration capacity and prevents natural water accumulation. At the present stage, the grass-covered bed of the pond with an area of 0.6 hectares is in a state of long-term exposure conservation. The pond, which according to A. D. Zhirnov's plan was supposed to be a landscape accent, has turned into a grassy hollow that disrupts the integrity of the exhibition area (Figs. 1–2).

The implementation of a landscape and environmental planning in combination with the concept of green-blue infrastructure allows

the existing ravine to be transformed into a functional ecosystem node for intercepting surface runoff. In order to optimize the water balance of the territory, instead of the process of uncontrolled infiltration of atmospheric precipitation into the lower horizons, it is proposed to install an artificial waterproofing screen. This design solution will transform the pond bed from a drainage area into a functional reservoir for storing meltwater and rainwater. This will



Fig. 1 – Satellite imagery showing the spatial localization of the de-functionalized pond bed within the dendrological park's vegetation structure

Transforming the bed into a functional depot for collecting and accumulating surface runoff will solve the problem of irrigation water shortages. Creating an autonomous irrigation reservoir will ensure the technological independence of the introduction nursery and perennial flower collection, which is a necessary condition for the viability of the facility in the context of climate change.

The creation of a reservoir will initiate the development of ecotopes suitable for the formation of hydrophilic communities and coastal-aquatic ecosystems. The implementation of the proposed solutions will contribute to the natural enrichment of the arboretum's biodiversity. Thanks to the creation of a spacious littoral zone, the pond will serve as the main center of biological diversity for aquatic and coastal flora and fauna. This significantly increases the scientific and educational potential of the arboretum, presenting it as an object with fully functioning aquatic biotopes. A list of previously unavailable ecosystem services is presented in Table 1.

The failure to complete the hydraulic engineering works during the establishment of the arboretum is now seen not only as an engineer

create a “wet oasis” that will naturally ensure natural thermoregulation and optimization of the microclimate of the surrounding areas of the arboretum. The water mirror will create the conditions for effective thermoregulation and microclimate stabilization, neutralizing temperature stress for introduced species during periods of extreme summer drought. Thus, the created reservoir will act as a natural moderator of the surface air layer.



Fig. 2 –The existing relief of the ravine

ing shortcoming of the past, but also as a fundamental scientific challenge. Historical retrospectives show that the architectural concept of the founders, which envisaged the creation of a water feature, was ahead of the technical capabilities of the time. The high infiltration capacity of the soil in the 1970s became an insurmountable obstacle to natural water accumulation [17].

At the present stage, modern nature-oriented solutions are overcoming this technological gap. What was unattainable half a century ago due to the lack of perfect waterproofing means is now being implemented through innovative approaches to water resource management.

The use of modern materials to form an artificial waterproofing screen for the implementation of surface runoff interception systems is a logical conclusion to A. D. Zhirnov's historical idea, adapted to the requirements of today's climate stability. The restoration of the water mirror corrects the long-standing “landscape pause”, transforming the pond into a functional moderator of the microclimate and a center of biotopic attraction, combining the historical concept with modern environmental requirements.

Table 1

List of previously unavailable ecosystem services

Ecosystem Service Category	Current State (De-functionalized Bed)	Projected State After Revitalization	Ecosystem Effect
Regulating (Climate)	Increased air aridity; thermal stress for mesophilic introduced species.	Hydromorphic microclimate moderation; natural humidification of the surface air layer.	Reduction of summer temperature peaks; enhanced plant viability and resilience.
Provisioning (Resource)	Irreversible infiltration of runoff into sandy horizons; total dependence on external water sources.	Accumulation of surface runoff in the created reservoir for irrigation purposes.	Technological autonomy of the nursery (1.0 ha) and flower beds (0.3 ha); resource conservation.
Supporting (Biological)	Absence of hydrophilic biotopes.	Creation of ecotopes for macrophytes and coastal fauna; formation of a bio-filtration system.	Increased biodiversity; strengthening of the park ecosystem's self-regulation processes.
Cultural (Educational & Aesthetic)	Compositional fragmentation; perception of the basin as an unfinished/neglected object.	Restoration of the A.D. Zhirnov compositional dominant; enhancement of visual attractiveness.	Integrity of the landscape image; growth of recreational potential. Cognitive value: increased appeal for scientific research and education.

Research methodology, objects, and methods

A fundamental feature of this study, which we have repeatedly emphasized [14, 15, 16], is the implementation of landscape and ecological planning (LEP) not only within the potential bed of the water body but within the catchment area as a whole. Therefore, at all stages of LEP, a significant area encompassing both the water body and the adjacent land is subject to investigation.

To justify the project decision to revitalize the water body and accurately determine the morphometric characteristics of the ravine, digital terrain modeling methods were applied in the QGIS geographic information system environment. The work uses remote sensing data obtained from the OpenTopography global repository, where raster data from AW3D30 digital elevation models of the global digital product integrated into the European Space Agency Earth monitoring system was selected to ensure maximum micro-relief detail – Copernicus DEM (Digital Elevation Model) [19].

High accuracy of morphometric analysis of the territory was ensured by using the ALOS World 3D (AW3D30) global digital surface model [20]. This dataset, provided by the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), is based on the results of precision stereomapping

performed using the PRISM panchromatic sensor of the DAICHI satellite. The methodological advantage of the selected dataset lies in its genesis: the model with a horizontal resolution of about 30 meters (1 arc second) is derived from a high-precision commercial network with a 5-meter step.

The use of AW3D30 in the study is due to its recognized stability and high vertical accuracy, which currently meets the leading global standards among open sources of geospatial information. The use of archival data in combination with modern GIS correction tools made it possible to form a reliable topographic basis for designing the reservoir bed, minimizing errors associated with micro-relief features.

By spatially restricting the object's geographic coordinates, it was possible to localize the pond bed and adjacent slopes, which created a reliable basis for further design. As a result, the digital model obtained became the basis for calculating the volumes of the future pond bed, determining the boundaries of the water mirror, and designing a waterproofing screen, taking into account all the features of the natural slope of the surface (Fig. 3).

The final stage of digital data processing was the development of a spatial relief model in

the SketchUp architectural design environment [21], namely, the transformation of vectorized relief data into a three-dimensional analytical model. The use of SketchUp tools in combination with surface interpolation methods made it possible to create a digital copy of the pond bed, which is a necessary condition for the transition from two-dimensional planning to three-dimensional engineering design. The process began with the integration of raster and vector materials obtained in GIS into a three-dimensional environment. This ensured the topographic

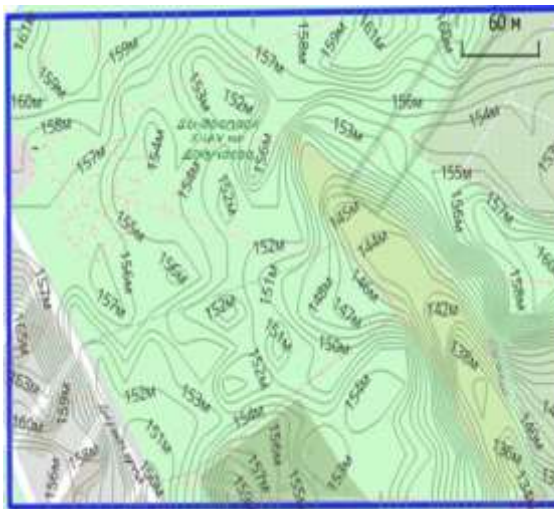


Fig. 3 – Digital Elevation Modeling (DEM) for pond restoration in QGIS environment.

The introduction of volumetric modeling solves a number of tasks, namely, it provides the opportunity to study in detail the steepness of slopes and morphological features of the bed from any angle, allows

Research findings and discussion

The justification for the algorithm of water body restoration within the arboretum's structure is based on the concept of landscape and ecological planning [22, 23, 24, 25]. Since landscape and ecological planning focuses on small-scale areas at the local level of environmental organization, the application of this approach allows for the creation of a water body to be considered an organic element of the arboretum's landscape organization.

The inventory stage traditionally encompasses the study of natural landscape components and the socio-economic environment, alongside the creation of corresponding cartographic works. The work commenced with the delineation of the catchment area boundaries,

accuracy of the future model and its correspondence to the actual geographical coordinates of the object (Fig. 4).

The generation of a polygonal grid based on 0.5 m contour lines enabled a high-precision reconstruction of the object's morphological structure. Specifically, it allowed for the clear localization of the ravine thalweg, which determines the natural runoff vector, as well as the geometric parameters of the ravine brows that form the spatial boundaries of the catchment area and the designated bio-filtration zone

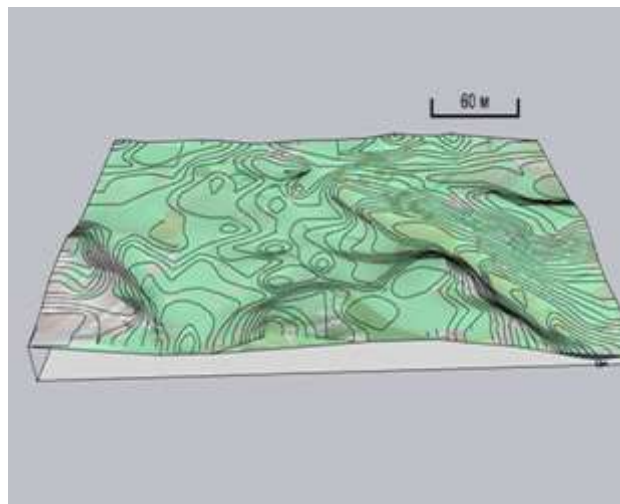


Fig. 4 – 3D digital terrain model of the projected pond bed, visualized in SketchUp.

identifying the lowest relief marks for the rational placement of hydraulic structures, and creates a basis for calculating the filling levels of the reservoir and modeling the water mirror.

which directly participate in forming the ecological status of the water body. For this purpose, GIS modeling of the catchment territory was employed (Fig. 1). The use of geographic information systems for generating terrain contours creates a basis for predicting hydromorphometric indicators, while the application of the "from model to object" principle allows for the transformation of digital data into a precision design of the pond bed. The construction of a polygonal model in the SketchUp environment served as a tool for transitioning from theoretical analysis to the practical reproduction of the water body's geometric parameters.

The next component of the natural characterization of the study object, as with other

territories, is the geological one; however, since the focus is on the restoration of the pond, the authors utilized results from previous research in the project.

The specificity in addressing the next component – soils – lies in the fact that they are clearly distinguished within the catchment basin but 'disappear' within the boundaries of the water body itself. However, the very existence of the pond necessitates the formation of natural-technogenic ecosystems, which consist of the aquatic ecosystems proper and transitional ecosystems between them and the adjacent land, which territorially correspond to water protection zones. These encompass zones of flooding, partial inundation, and zones of erosional activity, which are appropriately delineated within the project.

In the inventory phase documentation, particular emphasis is placed on climatic characteristics, as the water body is sensitive to climatic changes. In addition to studying data on temperature dynamics, precipitation patterns, periods of ice cover, and flood events, the assessment stage of the landscape and ecological planning involved an investigation of the snow cover to determine potential pond contamination from surface runoff during the spring thaw.

The final natural component required to form a comprehensive understanding of the landscape is vegetation. Consequently, significant attention was paid to the accurate representation of the structure of both the current phytocenosis and the one that preceded it. At the same time, the revitalization project envisages the replacement of the natural vegetative cover.

The pond is surrounded by developed green spaces and pine massifs that function as a natural buffer. The preserved natural herbaceous cover of the arboretum significantly minimizes the risks of agrochemical runoff, while the absence of impermeable asphalt surfaces within the adjacent territory contributes to the maintenance of a healthy hydrological regime.

Consequently, the results of the inventory stage provided the basis for the subsequent assessment stage of landscape and ecological planning, in which ecological-geochemical studies of the defined territory constitute a mandatory component. Within this approach, assessing the quality of water resources intended for filling the reservoir enables the prediction of the aquatic system's state upon completion of the works.

Given the specific features of its creation and location, the filling of the water body is

significantly facilitated by atmospheric precipitation and surface snowmelt runoff. This paper presents the results of a chemical analysis of the snow cover sampled within the territory of the arboretum during the winter period.

The aforementioned analysis is regarded as an integral component of the comprehensive monitoring of the aquatic environment's quality. These data constitute a necessary link for understanding the baseline ecological status and assessing the potential nutrient loading on the ecosystem during the spring flood period. Such an approach enables the detection of early signs of anthropogenic impact and serves as a foundation for further long-term observations to ensure the sustainable functioning of the water body within the arboretum.

The study was conducted by sampling the snow cover within the territory of the arboretum. Snow water was obtained by controlled melting of samples at room temperature. This approach made it possible to analyze the chemical composition of precipitation in its "primary" state, reflecting the level of atmospheric load on the ecosystem. The obtained water was analyzed for the content of priority pollutants. Given the absence of direct standards for the content of chemicals in snow cover, the quality of the melted snow water was assessed by comparison with the Hygienic Water Quality Standards, approved by Order No. 721 of the Ministry of Health of Ukraine, dated May 2, 2022 [26]. This approach allows us to predict changes in the chemical composition of pond water during spring snowmelt and to determine the compliance of snow water with the water quality requirements for water bodies used for domestic and industrial purposes.

The assessment methodology under the above-mentioned order provides for the use of maximum permissible concentrations (MPC) or indicative permissible levels (IPL) of substances. The assessment is based on the limiting hazard indicator, which determines the most sensitive area of impact of a substance: sanitary-toxicological, general sanitary, or organoleptic. An important element of the analysis is also the classification of pollutants by hazard classes, which allows the identified substances to be ranked according to their potential risk to the aquatic environment and public health [26]. The comprehensive combination of these parameters ensures a high degree of reliability of the environmental forecast within the framework of developing

measures for the revitalization of the reservoir. The assessment was carried out according to physical, chemical, and chemical indicators characterizing its hydrogen index, salt

composition, the presence of biogenic elements, and potentially toxic substances.

The results of determining the content of chemicals in snow water are presented in Table 3.

Table 3
Integrated ecological assessment of snow water chemical content, 2026

Parameter	Value	MPC [26]	IPL [26]	Limiting Hazard Indicator	Hazard Class
pH	6.62	6.5–8.5	–	–	–
Nitrates, mg/dm ³	0.18	45	–	Sanitary-toxicological	3
Phosphates, mg/dm ³	0.02	3.5	–	Organoleptic	3
Chlorides, mg/dm ³	3.00	350	–	Organoleptic (affects water taste)	4
Calcium, mg/dm ³	1.00	–	200	Organoleptic (affects odor and taste)	3
Magnesium, mg/dm ³	0.60	–	50	Organoleptic (affects odor and taste)	3
Sodium, mg/dm ³	0.30	200	–	Sanitary-toxicological	2
Sulfates, mg/dm ³	2.49	500	–	Organoleptic (affects water taste)	4
Iron, mg/dm ³	0.0002	0.3	–	Organoleptic (affects color)	3
Zinc, mg/dm ³	0.011	1.0	–	Effect on the overall sanitary regime of the water body	3
Copper, mg/dm ³	0.001	1.0	–	Organoleptic	3
Manganese, mg/dm ³	0.000	0.1	–	Organoleptic (affects color)	3
Cadmium, mg/dm ³	0.001	≤ 0.001	–	–	2
Chromium [Cr ⁶⁺], mg/dm ³	0.002	0.05	–	Sanitary-toxicological	3
Cobalt, mg/dm ³	0.005	0.1	–	Sanitary-toxicological	2
Nickel, mg/dm ³	0.004	0.10	–	Sanitary-toxicological	3
Lead, mg/dm ³	0.008	0.03	–	Sanitary-toxicological	2

The results of chemical analysis of snow water collected in the winter of 2026 indicate an extremely low level of anthropogenic load. The values obtained for all indicators comply with the requirements of Order No. 721 of the Ministry of Health. Particular attention is drawn to the state of substances of the 2nd hazard class. The concentration of highly hazardous cobalt and lead in the samples is minimal, in particular, the lead content is 0.008 mg/dm³ with an MPC of 0.03 mg/dm³, and cobalt is 0.005 mg/dm³ with a MPC of 0.1 mg/dm³. However, the concentration of cadmium is 0.001 mg/dm³, which is equal to the MPC. This

“borderline” situation requires special attention, as cadmium has the property of bioaccumulation in the food chains of aquatic ecosystems [27].

Mineralization indicators: chlorides – 3.0 mg/dm³, sulfates – 2.49 mg/dm³, sodium – 0.30 mg/dm³, calcium – 1.0 mg/dm³, magnesium – 0.60 mg/dm³ demonstrate an extremely low content of dissolved salts. Total mineralization is 0.013 g/dm³. The pH of 6.62 is close to neutral. Such snow water acts as a natural “solvent” that can reduce the total concentration of salts in the surface waters of the pond after summer evaporation. The annual filling of the pond with water

of such high quality is a factor in its sustainable functioning.

The content of biogenic compounds, namely nitrates, is 0.18 mg/dm^3 , phosphates – 0.02 mg/dm^3 , which is extremely low compared to their MPC: 45 mg/dm^3 and 3.5 mg/dm^3 , respectively. The minimal presence of biogenic elements in meltwater inhibits the primary productivity of algae at the beginning of the growing season and creates conditions for the competitive advantage of higher aquatic vegetation. The latter, thanks to their longer vegetation cycle, effectively assimilate nutrients, inhibiting the development of blue-green algae throughout the season.

Low concentrations of Fe, Mn, Zn, Cu, Co, and Ni in snowmelt do not pose a toxicological threat, as they are significantly lower than the established MPCs. In the context of an artificial ecosystem of a pond with container-grown macrophytes, these concentrations can be considered not as pollutants, but as a potential source of essential micronutrients, in particular, iron, manganese, copper, and zinc, which are essential cofactors of photosynthetic enzymes and components of chlorophyll [28].

Summarizing the results of hydrochemical analysis, it can be stated that snow cover in the arboretum is a source of high-quality water with minimal anthropogenic impact. The absence of excess biogenic substances, low mineralization, and favorable pH create the conditions for the formation of a stable hydrochemical regime in the pond and prevent the intensification of eutrophication processes. At the same time, a balanced content of essential microelements, whose concentrations are significantly lower than the maximum permissible levels but physiologically significant, can contribute to maintaining the functional activity of macrophyte metalloenzyme systems during their vegetation. However, the concentration of cadmium, which is approaching the maximum permissible limit, indicates the need for systematic environmental monitoring to control the dynamics of this priority toxicant.

The next stage of landscape and ecological planning is generalization and forecasting. This stage is specifically dedicated to the development of the pond restoration project. An individual approach to the design object takes into account the specific nature of the arboretum as an object of the nature reserve fund and the particularities of land use within its

boundaries. The revitalization strategy focuses on the formation of stable ecotopes capable of self-regulation.

The application of a systematic algorithm of landscape and ecological planning transforms the pond revitalization into a scientifically managed process, where every stage – from digital modeling to hydrobiological observations of water quality and bottom sediments – is aimed at forming a stable, functional, and self-regulating aquatic component of the arboretum.

The creation of a water body should serve as a factor for increasing landscape diversity. According to the principles of landscape and ecological planning, the revitalization of a pond should be based on the creation of a heterogeneous bed structure. Instead of a uniform deep-water bed, a division into two main functional zones is proposed: a deep-water accumulative part and a shallow-water biological treatment zone (bioplato).

Digital modeling confirms that the morphology of the beam already contains a formed depression, which serves as the basis for the future reservoir. Although the bed requires technological refinement to achieve the design marks, the scope of this work is significantly smaller compared to the construction of an artificial basin “from scratch.” The presence of such a prepared relief allows the focus to shift from massive earthworks to precision bottom planning. This minimizes soil excavation and provides favorable conditions for laying a waterproofing screen. Thus, the use of the natural contours of the ravine significantly optimizes the cost structure of the project, transforming landscape features into a significant economic asset. Thus, the integration of natural forms into the project model ensures the rational use of funds, transforming the geomorphological features of the territory into an economic asset for revitalization measures.

An essential aspect of ensuring the functional stability of artificial reservoirs is the creation of a reliable anti-seepage liner. Modern waterproofing for such facilities is represented by two main types of materials: polymer geomembranes and geosynthetic clay liners. Within the framework of our project, we consider the use of geosynthetic clay liners, specifically bentonite mats, as the optimal solution for pond restoration.

Bentonite mats are a high-tech composite consisting of natural sodium bentonite mineral and polymer fibers, which allows for the

combination of natural clay's environmental friendliness with the strength and adaptability of synthetic materials [29]. These materials ensure the long-term sustainability of ecosystems due to their ability to adapt to the physicochemical changes of the environment. The primary advantage of these materials, in contrast to traditional polymer geomembranes, is their self-healing capacity for minor damages, facilitated by the sodium bentonite that swells upon contact with water. This is particularly crucial when installing on existing microrelief with a significant number of inflections. The ultra-low filtration coefficient of these materials upon full hydration guarantees the retention of the calculated water volume and the stability of the water table, even during periods of precipitation deficit [30].

Modern approaches to improving anti-seepage liners are aimed at increasing their operational reliability by enriching materials with natural components. As evidenced by current research [31], the introduction of biopolymers, specifically agar-agar, significantly increases the strength of bentonite mats, ensuring their structural integrity under the pressure of the water mass. Another promising direction is the regulation of bentonite swelling properties: optimizing this parameter helps prevent deformations of the pond bed and preserves the designed contours of shallow-water bioplatoons [31].

When designing the pond, we rejected the idea of creating a geometrically correct reservoir in favor of a natural model of a water body. Instead of a monotonous bottom, the project envisages the formation of zones of varying depths. Research by Linares et al. identifies the physical conditions of the habitat as an indispensable tool for maintaining biodiversity in artificial reservoirs, directly affecting their ecological sustainability. The creation of various depth gradients with a smooth transition from the shore to the deep zone ensures the formation of a stable and rich ecosystem [32]. According to the conclusions of Oertli and Parris [33], the main focus in design should be on the banks of ponds, as they support a significant part of the overall biodiversity of the water body, providing fauna with places for shelter, reproduction, and migration between aquatic and terrestrial environments. An expanded shallow water zone ensures faster water warming, activates zooplankton development, and creates numerous ecological niches. Although diversity of shore characteristics at the landscape level is

desirable, it is shallow water profiles, according to researchers, that promote the development of aquatic vegetation and create high habitat heterogeneity, which should become the norm in urban and park landscape design [33, 34].

The basis was the modeling of the bed profile with a smooth concave curve, with an expanded shallow zone, which occupies about 40% of the total water surface area, to the maximum depth. Sufficient space creates conditions for the development of macrophytes and benthic communities, which are the basis for the natural self-purification processes of the reservoir. The deep-water zone of the reservoir will serve as an ecological refuge for aquatic organisms during extreme temperatures, preventing complete freezing or overheating, thereby enhancing the overall stability of the ecosystem.

For the development of the shallow-water zone, a layer of high-density geotextile is laid over the previously installed bentonite mats. Its primary function is to provide mechanical protection for the bentonite liner against punctures by plant rhizomes and to prevent substrate erosion. A mineral substrate with a thickness of 15–20 cm is placed on top of this protective layer. It is recommended to use a mixture of washed gravel and zeolite. Zeolite acts as an ion-exchange filter that absorbs ammonium and phosphates, thereby preventing eutrophication and maintaining the required water quality.

Oxygenating plants are the actors of aquatic ecosystem health. They are planted in substrate or coconut mats, and for many species, plant parts can be added directly to the water. These plants are the real secret to the health of a pond, which is usually hidden beneath its surface, so they remain largely invisible to the eye. Since the substrate is inert, oxygenators are forced to absorb nutrients directly from the water column, acting as a “biological pump” and saturating the water with oxygen, working tirelessly to keep the water clean and clear. The root system of oxygenators develops horizontally within the substrate, without reaching the waterproofing layer thanks to a separate layer of geotextile.

A list of recommended oxygenating plants, compiled on the basis of an analysis of the works of G. Speichert, S. Speichert, and D. G. Hessayon, is presented in Table 2 [35, 36].

Coastal flora forms a transitional zone of the reservoir. Its root system is immersed in the bottom substrate under water, while the main

Table 2

Recommended aquatic oxygenators and their Functional Significance in pond ecosystems

Plant Name (Latin)	Optimal Depth (m)	Max Depth (m)	Functional Significance
<i>Elodea canadensis</i>	0.2–0.8	up to 3.0	Powerful oxygenator. Has one of the highest oxygen release rates per unit of biomass. Acts as a high-capacity biological pump, absorbing mineral nutrients.
<i>Myriophyllum spicatum</i>	0.5–1.5	up to 3.5	Powerful oxygenator. Thanks to its finely divided structure, the leaves provide maximum gas exchange area. Works effectively in synergy with <i>Elodea canadensis</i> .
<i>Potamogeton crispus</i>	0.5–1.2	up to 2.5	Early starter. Ensures oxygen balance in early spring while other plants are still dormant.
<i>Chara vulgaris</i>	0.4–1.0	up to 5.0	Biogenic calcification. In addition to oxygenation, it effectively absorbs carbonates and clarifies water.
<i>Potamogeton lucens</i>	0.8–1.5	up to 3.0	Deep-water aeration. Large leaves effectively saturate the middle and lower layers of the water body with oxygen.
<i>Ceratophyllum demersum</i>	0.5–2.0	up to 9.0	Nitrogen control. Ideal for ammonium absorption; functions even in low-light conditions at significant depths.
<i>Eleocharis palustris</i>	0.0–0.2	up to 0.5	Bank stabilization. Creates a dense sod mat that prevents bank erosion and filters surface runoff. Stabilizes zeolite substrate. Provides bottom aeration and shelters fish fry.
<i>Eleocharis acicularis</i>	0.1–0.5	up to 1.0	Benthic filter. Forms underwater "meadows" that purify the near-bottom water layer.
<i>Hottonia palustris</i>	0.3–0.6	0.8	Bioindicator of water purity and oxygen saturation. Superior spawning substrate: soft leaves do not damage fish eggs.
<i>Fontinalis anti-pyretica</i>	0.4–1.0	4.0	Year-round aeration and heavy metal sequestration. Provides bactericidal protection for fish eggs; remains active even under ice.
<i>Tillaea aquatica</i>	0.0–0.2	0.3	Egg protection in extreme shallows.

part of the shoots actively develops in the air. Unlike oxygenators, coastal plants have almost no effect on the biological balance or purification of water, performing primarily a decorative and landscaping function of visually softening the contours of the reservoir. They skillfully blur the boundary between the water surface and the free, natural contours of the reservoir. In summer, plants such as *Iris pseudacorus*, *Acorus calamus*, *Alisma plantago-aquatica*, *Caltha palustris*, *Butomus umbellatus*, *Carex stricta*, *Pontederia cordata*, *Scirpus lacustris*, and *Veronica beccabunga* become the main accents, decorating the pond with their flowers and textured leaves (Fig. 5).

The use of the existing dam as a structural element allows for the implementation of a gravity aeration system. The installation of an overflow pipe in the dam body provides a waterfall effect. This technical solution promotes intensive gas exchange at the air-water interface, further enriching the flow with oxygen before it enters the deeper part of the pond, thereby optimizing the reservoir's water chemistry. To maintain continuous circulation, an autonomous solar power generation system is installed on the dam

Photovoltaic panels power pumps that provide vertical and horizontal water exchange, equalizing the temperature regime (Fig. 6). The combination of natural purification methods with technological solutions allows the creation of a sustainable center for biodiversity conservation, which simultaneously performs the economic tasks of the park, in particular, the accumulation of water for irrigation. The distribution of the dam allows you to simultaneously create a decorative area with a significant amount of coastal plants, stabilize the hydrological regime by creating a reservoir volume, and does not interfere with the natural purification of water by oxygenating plants. The presence of areas with calm water opens up the possibility of introducing a collection of species and cultivars of the genus *Nymphaea*. These plants require a stable water surface without strong currents, which is made possible by the correct zoning of the reservoir [35, 36].

The formation of a branched vegetation structure – from submerged macrophyte beds to dense coastal helophyte thickets – is conducive to maintaining a high level of biological diversity in the reservoir. The creation of such natu-



Fig. 5 – Visualization of part of the pond with coastal plantings



Fig. 6 – Forced aeration and water circulation in the project model of the pond

ral centers, where plants with different requirements for immersion depth and insolation intensity are harmoniously combined, is one of the most ecologically justified and effective approaches to ecosystem management. Enriching the floristic composition stabilizes the internal ecosystem of the water body and creates a stable basis for the development of all associated fauna [33].

The ecological stability and biological diversity of a pond are largely determined by the nature of land use within its catchment area. A pond of high ecological quality is characterized

primarily by high water quality, in particular, the absence of excessive inflow of biogenic substances and low concentrations of pollutants. Important features of such a reservoir are developed areas of aquatic vegetation, natural morphology of the banks with gentle slopes, and the absence of invasive alien species [33].

The mechanisms of functioning of artificial water body ecosystems require special attention from researchers, as they differ significantly from their natural counterparts. The revitalization of the water body in the arboretum gives cause for optimism regarding water quality.

Conclusions

To restore the pond in the B. F. Ostapenko Arboretum, a complex of landscape and ecological planning measures was conducted. The inventory phase resulted in a GIS terrain model of the area where the aquatic anthropogenic landscape is planned, along with a systematic collection of the territory's natural characteristics (geological-geomorphological, pedological, climatic, and vegetative).

The assessment stage focused on determining the potential impact of the catchment basin's landscape on the hydrochemical water characteristics by evaluating the chemical composition of the snow cover, which serves as the primary source of water inflow to the pond via surface runoff. It was established that the meltwater possesses low mineralization and a minimal content of nutrients, which acts as a determining factor in inhibiting eutrophication processes and maintaining the pond's clarity. Despite safe concentrations of most heavy metals, the detection of cadmium at the threshold of the maximum permissible concentration (MPC) indicates potential risks of its bioaccumulation within the trophic chains of the artificial ecosystem. At the same time, the presence of Zn, Cu, Fe, Mn, and Co in non-toxic concentrations creates a favorable background for the mineral nutrition of macrophytes in container culture.

At the stage of generalization and forecasting, utilizing GIS modeling and 3D visualization methods based on Copernicus DEM and AW3D30 data, the projected bed was adapted to the existing microrelief of the gully with high

precision. This minimizes the volume of earthworks and ensures optimal zoning of the water body, with the delineation of an accumulative zone and a shallow-water biological treatment zone (bioplato).

Several technological solutions are proposed to minimize the negative environmental impact of adjacent landscapes on the aquatic anthropogenic landscape:

- The implementation of bentonite barriers allows for the mitigation of the high infiltration capacity of the sandy bed;

- The use of geotextiles in the coastal zone ensures mechanical protection of the bentonite liner and stabilizes the shoreline;

- The synergy between the ion-exchange properties of the zeolite substrate and the vital activity of macrophyte oxygenators enables effective self-purification;

- The introduction of a solar power system for forced aeration and water circulation ensures the stability of the hydrochemical regime, even during periods of extreme drought.

The creation of a reservoir will transform a dysfunctional area into an ecological asset for the arboretum. The implementation of the project will generate new ecosystem services, from the climate moderation of a “wet oasis” to the formation of an autonomous irrigation reservoir, which directly contributes to the achievement of UN SDG 15.1: Ensure the conservation, restoration, and sustainable use of terrestrial and inland freshwater ecosystems.

Conflict of interest

The authors certify that although one of the authors of the article is the Editor-in-Chief of this journal, the peer-review process, the publication decision, and the editing process were conducted independently, without their participation or influence. The peer review and the final decision were carried out by other members of the editorial board who are not co-authors. Any potential conflicts of interest were fully mitigated through external oversight of the process.

In addition, the authors have fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and duplicate publication.

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

AI Statement

In this study, generative artificial intelligence was not used.

Project compliance

The research was carried out as part of the budgetary research project “Ways to restore the green and blue infrastructure of frontline cities”.

References

1. Ilhin, L. V. (2008). Limnocomplexes of the Ukrainian Polissia: Regional features and optimization, (Vol. 2). Vezha. (in Ukrainian).
2. Ilhin, L. V. (2008). Limnocomplexes of the Ukrainian Polissia: Natural-geographical bases of research and regional patterns. (Vol. 1), Vezha. (in Ukrainian).
3. Khilchevskiy, V. K., & Zabokrytska, M. R. (2022). Features of normative assessment of water quality of water bodies for recreational purposes in Ukraine. *Hydrology, hydrochemistry and hydroecology*, 1(63), 40–51. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2022.1.4> (in Ukrainian).
4. Khilchevskiy, V. K. (2021). Water monitoring in Ukraine: methods for assessing water quality for various purposes in connection with changes in the regulatory framework (2014–2021). *Hydrology, hydrochemistry and hydroecology*, 3(61), 6–19. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.3.1> (in Ukrainian).
5. Shcherban, M. H., Lytvynenko, M. I., Garnyk, V. V., Melnyk, L. M., & Vasenko, O. H. (2015). A comparative study of the state of recreational water bodies of Kharkiv region according to the sanitary and ecological research. *Odessa Medical Journal*, 6(152), 62–66. Retrieved from <https://journal.odmu.edu.ua/?p=3842> (in Ukrainian).
6. Novytska, S. R. (2017). The assessment of water quality in water resources use in Ternopil region recreation purposes. *Scientific Notes of Ternopil National Pedagogical University: Geography*, (1), 124–131. Retrieved from <http://dspace.tnpu.edu.ua/handle/123456789/8551> (in Ukrainian).
7. Khilchevskiy, V. K. (2021). Recreational aquatic environment quality assessment: Global trends, WHO guidelines, EU bathing water directive. *Hydrology, hydrochemistry and hydroecology*, 4(62), 6–17. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.4.1> (in Ukrainian).
8. Clifford, C. C., & Heffernan, J. B. (2018). Artificial aquatic ecosystems. *Water*, 10(8), 1096. <https://doi.org/10.3390/w10081096>
9. Declerck, S., De Bie, T., Ercken, D., Hampel, H., Schrijvers, S., Van Wichelen, J., Gillard, V., Mandiki, R., Losson, B., & Bauwens, D. (2006). Ecological characteristics of small farmland ponds: Associations with land use practices at multiple spatial scales. *Biological Conservation*, 131(4), 523–532. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.02.019>
10. Jeffries, M. J. (2012). Ponds and the importance of their history: An audit of pond numbers, turnover and the relationship between the origins of ponds and their contemporary plant communities in south-east Northumberland, UK. *Hydrobiologia*, 689(1), 11–21. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0678-4>
11. Indermuehle, N., Oertli, B., Biggs, J., De Meester, L., Grillas, P., Hull, A., Nielsen, S. T., & Scher, O. (2008). Pond conservation in Europe: The European Pond Conservation Network (EPCN). *SIL Proceedings, 1922-2010*, 30(3), 446–448. <https://doi.org/10.1080/03680770.2008.11902163>
12. Freshwater Habitats Trust. (n.d.). *Million Ponds Project*. Retrieved from <https://freshwaterhabitats.org.uk/projects/million-ponds/>
13. Maksymenko, N. V., & Zinkovska, L. V. (2014). Evaluation of the aquatic ecosystem river Kharkiv means of landscape planning. *Man and Environment. Issues of Neoecology*, 1-2(21), 34–44. Retrieved from <https://periodicals.karazin.ua/humanenviron/article/view/877> (in Ukrainian).
14. Maksymenko, N. V., & Gohol, O. M. (2016). Comprehensive landscape-ecological index as the basis for the area's assessment. *Problems of Continuous Geographic Education and Cartography*, (24), 61–67. Retrieved from <https://periodicals.karazin.ua/pbgok/article/view/6409> (in Ukrainian).
15. Gohol, O. M., & Maksymenko, N. V. (2014). Morphology of the restored landscape of the modern territory of the Pechenihy reservoir. *Issues in Hydrology, Hydrochemistry, and Hydroecology: Proceedings of the 6th All-Ukrainian Scientific Conference with International Participation (Dnipropetrovsk, May 20–22, 2014)*. Aktsent PP, p. 42–44. (in Ukrainian).
16. Maksymenko, N. V. (2016). Principles of synergetic paradigm in landscape-ecological planning of river basin. *Scientific Letters of Academic Society of Michal Baludansky*, 4(1), 91–93.

17. Ostapenko, B. F., & Sytnik, I. Y. (2011). Parks of the Kharkiv National Agrarian University named after V. V. Dokuchaiev. Kharkiv National Agrarian University. (In Ukrainian).
18. Gololobov, V. V., Koval, I. M., & Gololobova, O. O. (2023). Revitalization of regular landscapes of the Arboretum exposition zone of the State Biotechnology University. *Man and Environment. Issues of Neoecology*, (40), 66-84. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2023-40-06> (in Ukrainian).
19. OpenTopography. (2016). *ALOS World 3D – 30m (AW3D30)* [Data set]. Retrieved from <https://portal.opentopography.org/raster?opentopoID=OTALOS.112016.4326.2>
20. European Space Agency. (n.d.). *Copernicus DEM [Data set]*. Copernicus Data Space Ecosystem. Retrieved from <https://dataspace.copernicus.eu/explore-data/data-collections/copernicus-contributing-missions/collections-description/COP-DEM>
21. Trimble Inc. (2024). *SketchUp* (Version 24.0) [Computer software]. Retrieved from <https://www.sketchup.com>
22. Maksymenko, N. V. (2017). Landscape and environmental planning as the basis for administrative decision-making on ecosystem services. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (45), 153–158. Retrieved from <https://periodicals.karazin.ua/geoeco/article/view/8192> (in Ukrainian).
23. Maksymenko, N. V. (2017). Landscape-ecological planning: theory and practice. Karazin Kharkiv National University. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/358118653> (in Ukrainian).
24. Maksymenko, N. V., & Burchenko, S. V. (2019). Theoretical Basis of the Green Infrastructure Strategy: International Experience. *Man and Environment. Issues of Neoecology*, 31(31), 16-25. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2019-31-02> (in Ukrainian).
25. Maksymenko, N. V., & Klieshch, A. A. (2017). Directions for optimization of natural resource use in environmental management for local areas. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 25(2), 81-88. <https://doi.org/10.15421/111722> (in Ukrainian).
26. Ministry of Health of Ukraine. (2022, May 2). On approval of Hygienic standards for water quality of water bodies for drinking, household and other needs of the population. (Order No. 721). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0524-22#Text> (in Ukrainian).
27. Ali, H., Khan, E., & Ilahi, I. (2019). Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Chemistry*, 2019, 1–14. <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>
28. Marschner, H. (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00007-8>
29. Rowe, R. K. (2020). Protecting the Environment with Geosynthetics: 53rd Karl Terzaghi Lecture. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146(9), :04020081. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002239](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002239)
30. Fu, X. L., Zhuang, H., Reddy, K. R., Jiang, N. J., & Du, Y. J. (2023). Novel composite polymer-amended bentonite for environmental containment: Hydraulic conductivity, chemical compatibility, enhanced rheology and polymer stability. *Construction and Building Materials*, 383, 131200. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131200>
31. Garoushi, A. H. B., & Uygur, E. (2025). Biopolymer and gypsum added Na bentonite for a more effective clay liner. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 50, 12587–12599. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09386-8>
32. Linares, M. S., dos Santos, L. B., Callisto, M., & Santos, J. C. (2023). Physical habitat condition as a key tool to maintain freshwater biodiversity in neotropical artificial ponds. *Water Biology and Security*, 2(3), Article 100189. <https://doi.org/10.1016/j.watbs.2023.100189>
33. Oertli, B., & Parris, K. M. (2019). Review: Toward management of urban ponds for freshwater biodiversity conservation. *Ecosphere*, 10(7), e02810. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2810>
34. Sayer, C., Greaves, R., & Emson, D. (2024). *Pond conservation and management: A guide to the restoration and creation of ponds for biodiversity*. University College London; Freshwater Habitats Trust. Retrieved from https://freshwaterhabitats.b-cdn.net/app/uploads/2024/01/UCL_FHT_pond_conservation_guide.pdf
35. Speichert, G., & Speichert, S. (2004). Encyclopedia of water garden plants. Timber Press. Retrieved from <https://www.scribd.com/document/86238440/Encyclopedia-of-Water-Garden-Plants>
36. Hessayon, D. G. (1993). The Rock & Water Garden Expert. Transworld Publishers Ltd. Retrieved from <https://www.scribd.com/doc/255021004/The-Rock-And-Water-Garden-Expert-pdf>

Submission received: 25.02.2026 / Revised: 27.03.2026 / Accepted: 30.03.2026 / Published: 30.05.2026

Н. В. МАКСИМЕНКО¹, 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>

В. В. ГОЛОЛОБОВ¹,
аспірант кафедри екологічного моніторингу та заповідної справи
e-mail: vadim.gololobov@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-0086-0303>

І. М. КОВАЛЬ^{1,2}, д-р с.-г. наук, ст. наук. співроб.,
професорка кафедри екологічного моніторингу та заповідної справи
e-mail: koval_iryana@ukr.net ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6328-1418>

О. О. ГОЛОЛОВОВА¹, канд. с.-г. наук, доц.
доцентка кафедри екологічного моніторингу та заповідної справи
e-mail: elena.gololobova@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5558-2114>

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

²Український орден «Знак Пошани» науково-дослідний інститут лісового господарства та
агролісомеліорації ім. Г. М. Висоцького,
вул. Григорія Сковороди, 86, м. Харків, 61024, Україна

ЛАНДШАФТНО-ЕКОЛОГІЧНІ ОСНОВИ РЕВІТАЛІЗАЦІЇ СТАВКА В ДЕНДРОЛОГІЧНОМУ ПАРКУ ІМЕНІ Б. Ф. ОСТАПЕНКА ДЕРЖАВНОГО БІОТЕХНОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Мета. Обґрунтування комплексної ревіталізації ставка дендропарку ДБТУ ім. Б. Ф. Остапенка як природо-орієнтованого рішення для адаптації екосистеми до кліматичних змін та відновлення історичного ландшафтного задуму А. Д. Жирнова.

Методи. Ретроспективний аналіз архівних проектних рішень, ландшафтно-екологічне планування, цифрове моделювання рельєфу, польові, лабораторно-аналітичні.

Результати. Шляхом ретроспективного аналізу архівних проектних рішень 1970–1971 рр. виявлено головну причину дефункціоналізації водного об'єкту – високу інфільтраційну здатність піщаного дна водойми, що унеможливило природну акумуляцію води. Проведено комплексну ландшафтно-екологічну оцінку території та обґрунтовано можливість відновлення водойми завдяки впровадженню сучасних інженерних рішень, зокрема створення протифільтраційного екрана на основі бентонітових бар'єрів. Розроблено тривимірну модель ложа ставка з виділенням зони біоплато. Запропоновано систему фітореMediaції за участю рослин-оксигенаторів. Доведено високу якість снігової води як ресурсу для наповнення водойми.

Висновки. Ландшафтно-екологічні умови території та використання сучасних технологій дозволять відновити водно-антропогенну екосистему ставка. Це трансформує дефункціоналізовану територію в активний екологічний вузол, що забезпечує кліматичну модерацію завдяки створенню «вологого оазису» та автономного іригаційного резервуара. Реалізація проекту безпосередньо сприяє досягненню ЦСР 15.1 ООН, гарантуючи стале функціонування колекцій інтродуцентів в умовах змінення клімату.

КЛЮЧОВІ СЛОВА. Ландшафтно-екологічне планування, ревіталізація, дендропарк, природоорієнтоване рішення, ГІС-моделювання, біоплато, біорізноманіття, рослина-оксигенатор, ціль сталого розвитку

Конфлікт інтересів

Автори засвідчують, що, незважаючи на те, що один із авторів статті є головним редактором цього журналу, процес рецензування, прийняття рішення щодо публікації та редагування проводилися незалежно, без їх участі чи впливу. Рецензування, остаточне рішення ухвалювалося іншими членами редакційної колегії, які не є співавторами. 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

У цьому дослідженні не використовувався генеративний штучний інтелект.

Відповідність проєкту

Дослідження виконане в межах реалізації бюджетної НДР «Шляхи відновлення зелено-блакитної інфраструктури прифронтових міст».

Список використаної літератури

1. Льїн Л. В. Лімноконплекси Українського Полісся : у 2 т. Т. 2. Регіональні особливості та оптимізація. Луцьк : Вежа ; Волин. нац. ун-т ім. Лесі Українки, 2008. 400 с.
2. Льїн Л. В. Лімноконплекси Українського Полісся : у 2 т. Т. 1. Природничо-географічні основи дослідження та регіональні закономірності. Луцьк : Вежа ; Волин. нац. ун-т ім. Лесі Українки, 2008. 316 с.
3. Хільчевський В. К., Забокрицька М. Р. Особливості нормативного оцінювання якості води водних об'єктів для рекреаційних цілей в Україні. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2022. №1(63). <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2022.1.4>
4. Хільчевський В. К. Моніторинг вод в Україні: методи оцінювання якості води для різних цілей у зв'язку зі змінами нормативної бази (2014-2021 рр.). *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2021. №3(61). С. 6-19. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.3.1>
5. Щербань М. Г., Литвиненко М. І., Гарник В. В., Мельник Л. М., Васенко О. Г. Порівняльний аналіз стану рекреаційних водойм Харківської області за результатами санітарних та екологічних досліджень. *Одеський медичний журнал*. 2015. № 6. (152). С. 62–66. URL: <https://journal.odmu.edu.ua/?p=3842> (дата звернення: 22.02.2026).
6. Новицька С. Р. Врахування оцінки якості води при використанні водних ресурсів Тернопільської області в рекреаційній галузі. *Наукові записки Тернопільського нац. пед. ун-ту: Географія*. 2017. №1. С. 124–131. <http://dspace.tnpu.edu.ua/handle/123456789/8551> (дата звернення: 22.02.2026).
7. Хільчевський В. К. Оцінювання якості рекреаційного водного середовища: світові підходи, рекомендації ВООЗ, директива ЄС щодо води для купання. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2021. № 4(62). С. 6–17. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.4.1>.
8. Clifford C. C., Heffernan J. B. Artificial aquatic ecosystems. *Water*. 2018. Vol. 10, Iss. 8. Art. 1096. <https://doi.org/10.3390/w10081096>.
9. Declerck S., De Bie T., Ercken D. et al. Ecological characteristics of small farmland ponds: Associations with land use practices at multiple spatial scales. *Biological Conservation*. 2006. Vol. 131. P. 523–532. URL: <https://ecopedia.s3.eu-central-1.amazonaws.com/pdfs/19.pdf> (дата звернення: 22.01.2026).
10. Jeffries M. J. Ponds and the importance of their history: An audit of pond numbers, turnover and the relationship between the origins of ponds and their contemporary plant communities in south-east Northumberland, UK. *Hydrobiologia*. 2012. Vol. 689. P. 11–21. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0678-4> (дата звернення: 22.01.2026).
11. Indermuehle N., Oertli B., Biggs J. et al. Pond Conservation in Europe: the European Pond Conservation Network (EPCN). *SIL Proceedings 1922-2010*. 2008. Vol. 30, Iss. 3. P. 446–448. <https://doi.org/10.1080/03680770.2008.11902163>.
12. Million Ponds Project. Freshwater Habitats Trust. URL: <http://www.freshwaterhabitats.org.uk/projects/million-ponds/> (дата звернення: 22.02.2026).
13. Максименко Н. В., Зінковська Л. В. Оцінка стану водної екосистеми р. Харків засобами ландшафтного планування. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2014. № 1-2 (21). С. 34–44. URL: <https://periodicals.karazin.ua/humanenviron/article/view/877> (дата звернення: 22.02.2026).
14. Максименко Н., Гоголь О. Комплексний ландшафтно-екологічний індекс як підґрунтя для оцінки стану територій. *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії*, 2016. (24), С. 61–67. URL: <https://periodicals.karazin.ua/pbgok/article/view/6409> (дата звернення: 22.02.2026).
15. Гоголь О. М., Максименко Н. В. Морфологія відтвореного ландшафту сучасної території Печенізького водосховища. *Проблеми гідрології, гідрохімії, гідроекології : матеріали VI Всеукр. наук. конф. з міжнар. участю (Дніпропетровськ, 20–22 трав. 2014 р.)*. Дніпропетровськ : Акцент ПП, 2014. С. 42–44.
16. Maksymenko N. V. Principles of synergetic paradigm in landscape-ecological planning of river basin. *Scientific Letters of Academic Society of Michal Baludansky*. 2016. Vol. 4, No. 1. P. 91–93.
17. Остапенко Б. Ф., Ситнік І. Й. Парки Харківського національного аграрного університету ім. В.В. Докучаєва. Харків: Харк. нац. аграр. ун-т., 2011. 184 с.
18. Гололобов В. В., Коваль І. М., Гололобова О. О. Ревіталізація регулярних ландшафтів експозиційної зони дендропарку Державного біотехнологічного університету. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2023. Вип. 40. С. 66–84. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2023-40-06>
19. ALOS World 3D - 30m (AW3D30) : [Digital Elevation Model portal]. OpenTopography. 2016. URL: <https://portal.opentopography.org/raster?opentopoID=OTALOS.112016.4326.2>

20. Copernicus DEM : [Digital Elevation Model portal]. Copernicus Data Space Ecosystem. European Space Agency. URL: <https://dataspace.copernicus.eu/explore-data/data-collections/copernicus-contributing-missions/collections-description/COP-DEM> (дата звернення: 12.01.2026).
21. SketchUp (Version 2023/2024) : [Computer software]. Trimble Inc. URL: <https://www.sketchup.com> (дата звернення: 12.01.2026).
22. Максименко Н. В. Ландшафтно-екологічне планування, як підгрунття управлінських рішень про надання екосистемних послуг. *Вісник ХНУ імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»* 2016. Вип. 45, С.153-158. <https://periodicals.karazin.ua/geoeco/article/view/8192> (дата звернення: 22.02.2026).
23. Максименко Н. В. Ландшафтно-екологічне планування: теорія і практика : монографія. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2017. 216 с. URL: <https://www.researchgate.net/publication/358118653> (дата звернення: 22.02.2026).
24. Максименко Н. В., Бурченко С. В. Теоретичні основи стратегії зеленої інфраструктури: міжнародний досвід. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2019. Вип. 31. С. 16–25. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2019-31-02>
25. Максименко Н. В., Клещ А. А. Напрямки оптимізації природокористування в інвайронментальному менеджменті територій локального рівня організації довкілля. *Journal of Geology Geography and Geoecology*, 2017. Т. 25. Вип. 2. С. 81–88. <https://doi.org/10.15421/111722>
26. Про затвердження Гігієнічних нормативів якості води водних об'єктів для задоволення питних, господарсько-побутових та інших потреб населення : Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 02 трав. 2022 р. № 721. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0524-22#Text> (дата звернення: 23.01.2026).
27. Ali H., Khan E., Ilahi I. Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Chemistry*. 2019. Vol. 2019. Article ID 6730305. 14 p. <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>
28. Marschner H. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. 3rd ed. Academic Press, 2012. 672 p. : <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00007-8>
29. Rowe R. K. Protecting the Environment with Geosynthetics: 53rd Karl Terzaghi Lecture. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2020. Vol. 146, Iss. 9. Art. 04020081. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002239](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002239)
30. Fu X. L., Zhuang H., Reddy K. R. et al. Novel composite polymer-amended bentonite for environmental containment: Hydraulic conductivity, chemical compatibility, enhanced rheology and polymer stability. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 383. Art. 131200. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131200>
31. Garoushi A. H. B., Uygur E. Biopolymer and Gypsum Added Na Bentonite for a More Effective Clay Liner. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2025. Vol. 50. P. 12587–12599. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09386-8>
32. Linares M. S., dos Santos L. B., Callisto M. et al. Physical habitat condition as a key tool to maintain freshwater biodiversity in neotropical artificial ponds. *Water Biology and Security*. 2023. Vol. 2, №. 3. Art. 100189. <https://doi.org/10.1016/j.watbs.2023.100189>
33. Oertli B., Parris K. M. Review: Toward management of urban ponds for freshwater biodiversity conservation. *Ecosphere*. 2019. Vol. 10. Iss. 7. Art. e02810. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2810>
34. Sayer C., Greaves R., Emson D. Pond conservation and management: A guide to the restoration and creation of ponds for biodiversity. London : University College London; Freshwater Habitats Trust, 2024. 36 p. URL: https://freshwaterhabitats.b-cdn.net/app/uploads/2024/01/UCL_FHT_pond_conservation_guide.pdf (дата звернення: 14.01.2026).
35. Speichert G., Speichert S. Encyclopedia of water garden plants. Portland: Timber Press, 2004. 486 p. URL: <https://www.scribd.com/document/86238440/Encyclopedia-of-Water-Garden-Plants>
36. Hessayon D. G. The Rock & Water Garden Expert. London: Transworld Publishers Ltd, 1993. 128 p. (Expert Series). URL: <https://www.scribd.com/doc/255021004/The-Rock-And-Water-Garden-Expert-pdf>

Отримано: 25.02.2026 / Переглянуто: 27.03.2026 / Прийнято: 30.03.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

<https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-09>

УДК (UDC): 574.3:556.114:621.311.22

Т. Л. РИЧАК,

аспірант кафедри екології

e-mail: taras_rychak@ukr.net

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-0848-6327>

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна

ОЦІНКА ЗАБРУДНЕННЯ ДОННИХ ВІДКЛАДЕНЬ ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ ПРИ ТРИВАЛОМУ ВПЛИВІ ТЕС

Мета: Оцінка геохімічного та екологічного стану донних відкладень у межах гідрологічної системи "р. Гнила Липа – Бурштинське водосховище – р. Дністер".

Методи. Польові, аналітичні, системний підхід для узагальнення результатів.

Результати. Зразки осадів відібрано на семи репрезентативних створах гідрологічної системи. Для інтерпретації даних на вміст важких металів (Cu, Zn, Cd, Pb) використовували показники: індекс геоакумуляції, коефіцієнт збагачення, індекс забруднення та токсикологічний скринінг. Отримані значення індексу геоакумуляції вказують на екологічне благополуччя, а геохімічний цикл Zn в басейні р. Гнила Липа визначається виключно природними літогенними процесами. Розраховані значення коефіцієнту збагачення лише для Cd на третьому створі вказують на антропогенну складову. Встановлено, що значення індексу забруднення у створах №3 та №5 визначають стан антропогенної деградації; на фонових та замикаючих створах індекс вказує на відсутність забруднення. Найвищий токсикологічний скринінг виявлено для Cd у створі №3, що дає підстави стверджувати про приховане екологічне навантаження, яке за несприятливих гідрохімічних умов може трансформуватися в реальну загрозу для бентосних біоценозів. Розраховані значення сумарної токсичності варіюють в межах, що відповідає низькому та помірному рівням екотоксикологічного ризику. Максимальне значення коефіцієнта зафіксовано в зоні акумуляції (створ №3), що є показником зростання біологічної небезпеки внаслідок синергетичного ефекту накопичених важких металів. Значення індексу навантаження забруднення та індексу забруднення визначили, що екологічний ризик, пов'язаний з наявністю важких металів у донних відкладеннях річок та водосховища був помірним.

Висновки. Результати дослідження мають практичне значення для розробки стратегій управління навколишнім середовищем для річкової системи Гнила Липа – Дністер. Виміряні рівні накопичення важких металів у донних відкладах слугують основою для оцінки екотоксикологічного стану водосховища та прогнозування стійкості водних екосистем до антропогенних впливів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: донні відкладення, водна екосистема, тепла електростанція

Як цитувати: Ричак Т. Л. Оцінка забруднення донних відкладень важкими металами при тривалому впливі ТЕС. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології.* 2026. Вип. 45. С. 109–123. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-09>

In cites: Rychak, T. L. (2026). Assessment of heavy metal contamination in bottom sediments due to long-term exposure to TPP. *Man and Environment. Issues of Neoecology*, (45), 109–123. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-09> (in Ukrainian)

Вступ

Екологічна дестабілізація водних об'єктів у зоні впливу енергетичних комплексів обумовлюється поєднаним впливом температурних та хімічних чинників. Порушення термодинамічної рівноваги акваторій внаслідок безперервного відведення низькопотенційного тепла спричиняє ланцюгову

реакцію структурних змін в екосистемі [1], що значно прискорює трансформацію біогеохімічних циклів у середовищі. Взаємодія температурних аномалій та постійного хімічного навантаження від зворотних вод трансформує гідрохімічний профіль водойми. Це стимулює кумуляцію токсикантів

© Ричак Т. Л., 2026



[This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

у донних відкладах та ініціює деградацію екосистеми через розрив її природних функціональних зв'язків [2].

Пріоритетним завданням вивчення водойм-охолоджувачів є дослідження донних відкладів як середовища, що депонує та стабілізує гідрохімічний режим об'єктів енергетики. Особливої наукової актуальності набуває оцінка міграційного потенціалу мікроелементів у системі «вода – донні відклади». Доведено, що через тривалу роботу ТЕС склад донних відкладів значно трансформується. Це створює ризик того, що раніше затримані на дні сполуки знову потрапляють у воду через зміну її хімічних або температурних показників [1].

Акумуляція техногенних поллютантів у донних осадах досягає концентрацій, здатні спричинити порушення механізмів саморегуляції водних екосистем. Пріоритетні токсиканти, зокрема важкі метали (Pb, Zn, Cu, Cd), виступають репрезентативними геохімічними індикаторами екологічного ризику [3]. Рівень їхньої кумуляції у донних відкладах річкових басейнів та водосховищ дозволяє верифікувати масштаби антропогенного тиску та оцінити потенційну загрозу для гідробіонтів [1, 3].

Отже, дослідження вмісту важких металів у донних відкладах залишається актуальним та спрямованим на вирішення важливої проблеми сучасності – створити екологічно безпечне водне середовище для підтримки функціонування усєї гідросистеми та екосистеми в цілому.

Сутність проблеми полягає у необхідності комплексного підходу до оцінки екологічного стану донних відкладів, і визначити масштаби акумуляції важких металів та інших забруднювачів для подальшого контролю та корекції ситуації.

Води водосховищ зазнають впливу температурних аномалій, евтрофікації, зміни газового режиму та накопичення біогенних та токсичних компонентів, що безпосередньо впливає на якість води для технічного та потенційного рекреаційного використання та рибицтва [4].

Донні відклади виконують роль депо важких металів, органічних сполук і продуктів техногенного навантаження, при зміні окисно-

відновних умов стали вторинним джерелом забруднення водної товщі [5]. Показники складу донних відкладів дозволяють адекватно оцінювати екологічний ризик антропогенного навантаження на водні об'єкти [6]. Дослідження науковців показали, що при погіршенні якості, донні відклади становлять потенційну загрозу для басейну річки, а просторовий розподіл важких металів пов'язаний зі стаціонарними джерелами забруднення та змінюється флювіальними процесами [7]. Тому кількісна оцінка вмісту забруднювальних компонентів у донних відкладах є важливим критерієм екологічного стану водних об'єктів і ефективним інструментом довгострокового екологічного моніторингу. Для мінімізації зазначених ризиків необхідне систематичне покращення водоочисних технологій, посилений контроль за станом води, а також інформування населення про можливі небезпеки.

Мета дослідження виявити просторовий розподіл важких металів у донних відкладах, оцінити геохімічний та екологічний стан донних відкладів у гідрологічній системі р. Гнила Липа – Бурштинське водосховище – р. Гнила Липа – р. Дністер за допомогою геохімічних та екологічних індексів.

Для досягнення поставленої мети необхідно проаналізувати стан поверхневих вод, донних відкладів, що були відібрані на репрезентативних створах гідрологічної системи, визначити основні види забруднювачів; провести гідрохімічний аналіз донних відкладів для виявлення небезпечних екологічних ризиків, змоделювати потенційні ризики для екосистеми, які можуть виникнути в результаті тривалого забруднення, запропонувати рекомендації для запобігання зниження ризиків для екосистеми.

Наукова новизна полягає у визначенні нових підходів до оцінки екологічного стану донних відкладів, пов'язаних із тривалим впливом теплової електростанції та обслуговуючої інфраструктури.

Прикладне значення роботи полягає у можливості застосування її результатів для удосконалення системи моніторингу поверхневих вод і донних відкладів.

Об'єкти і методи дослідження

Об'єктом дослідження є донні відклади гідрологічної системи під багаторічним впливом Бурштинської теплової електростанції (БуТЕС). БуТЕС – один із найбільших енергетичних об'єктів Західної України. Підприємство забезпечує централізоване

теплопостачання міста Бурштина та здійснює генерацію електричної енергії для Івано-Франківської, Львівської і Тернопільської областей, а також розташована на перетині ліній електропередач, що з'єднують Україну з європейською електромережею

через Румунію, Угорщину та Словаччину. Електрична потужність БуТЕС становить 2400 МВт, тепла – 177 Гкал, у тому числі 160 Гкал у системі гарячого водопостачання. Паливний баланс представлений переважно природним газом із частковим використанням вугілля, частка якого в останні роки має тенденцію до зменшення [8]. Обсяг реалізованої продукції підприємства склав 21 290,9 млн. грн., що відповідає близько 22 % загального обсягу промислової реалізації в Івано-Франківській області. Для забезпечення функціонування технологічних процесів електростанції здійснюється забір свіжої води в обсязі 22,424 млн. м³ [9]. У 2023 р. сумарні обсяги використання свіжої води та витрати води в оборотних і зворотних системах водопостачання становили 22,406 млн. м³ при встановленому ліміті 56,852 млн. м³ [10]. У процесі експлуатації БуТЕС утворюються різні категорії стічних вод,

зокрема теплообмінні води, транспортні води системи гідрозолошлаковидалення, промивні та регенераційні води після хімічного водоочищення, поверхневий стік із території промислового майданчика, а також господарсько-побутові стоки.

Предмет дослідження – хімічний стан донних відкладів та процеси акумуляції важких металів у гідрологічній системі під впливом ТЕС.

Комплексна оцінка еколого-хімічного стану донних відкладів та їхнього потенційного впливу на якість водного середовища базувалася на результатах польових досліджень, проведених у межений період 2025 року. Проби поверхневих вод і донних відкладів відбиралися на семи створах, що репрезентують просторову динаміку гідрохімічних показників досліджуваної екосистеми (рис. 1). Динаміку якості вод у системі «р. Гнила Липа – Бурштинське водосховище

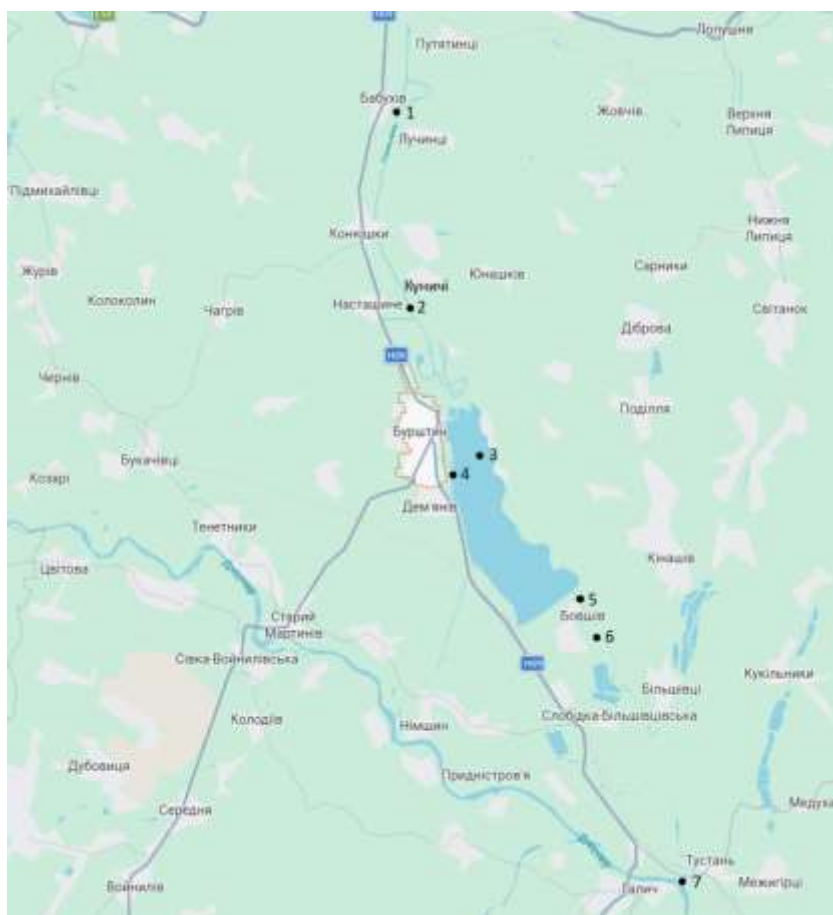


Рис. 1 – Карта-схема розташування створів дослідження в гідрологічній системі «р. Гнила Липа – Бурштинське водосховище – р. Гнила Липа – р. Дністер»

Примітка: цифрами позначено створи відбору проб донних відкладів*

Fig. 1 – Schematic map showing the locations of sampling sites in the hydrological system “Gnyla Lypa River – Burshtyn Reservoir – Gnyla Lypa River – Dniester River”

Note: The numbers indicate the sampling sites for bottom sediments*

– р. Дністер» детально проаналізовано в роботі [11], а також доповнено оцінкою впливу ракетних обстрілів на гідрохімічний стан водних об'єктів [12]. Репрезентативні створи

досліджень обирались, базуючись на геоморфологічні, гідродинамічні та екологічні особливості русел річок та акваторії водосховища (табл. 1).

Таблиця 1

Локалізація та екологічне обґрунтування мережі створів спостереження за станом донних відкладів

Table 1

Location and environmental justification of the network of monitoring stations for the condition of bottom sediments

Номер створу /	Місце розташування репрезентативного створу дослідження / Location of representative site of the study	Координати місць відбору донних відкладів / Coordinates of bottom sediment sampling sites	Характеристика антропогенного навантаження / Екологічне обґрунтування / Characteristics of anthropogenic load / Environmental justification
1	р. Гнила Липа (с. Бабухів) / Nnyla Lyra River (Babukhiv village)	49.354027 N, 24.611688 E	Фоновий створ. Розташований вище за течією від усіх джерел забруднення. Служить для встановлення природного рівня металів. Екологічно безпечна територія / Background level. Located upstream of all sources of pollution. Serves to establish the natural level of metals. Ecologically safe area
2	р. Гнила Липа (с. Куничі) / Nnyla Lyra River (Kunychi village)	49.305770 N, 24.621583 E	Місця, де течія сповільнюється, що сприяє осадженню дрібних фракцій, які найбільше сорбують метали. Ділянка поблизу населеного пункту, вплив автотранспорту / Places where the flow slows down, which contributes to the deposition of fine fractions that sorb metals the most. Area near a settlement, the impact of motor vehicles
3	Бурштинське водосховище, лівий берег (с. Коростовичі) / Burshtyn Reservoir, left bank (Korostovychi village)	49.25029 N, 24.66472 E	Водосховище, затока. Місця, де течія сповільнюється. Критична точка з виявленим найвищим вмістом вуглеводнів після ракетних бомбардувань у поверхневих водах / Reservoir, bay. Places where the flow slows down. Critical point with the highest hydrocarbon content detected after missile bombing in surface waters
4	Бурштинське водосховище, правий берег (м. Бурштин) / Burshtyn Reservoir, right bank (Burshtyn town)	49.253099 N, 24.645376 E	Рекреаційна територія, місця для рибальства / Recreational area, fishing areas
5	р. Гнида Липа (с. Бовшів, східна окраїна села) / Nnyla Lyra River (Bovshiv village, eastern outskirts of the village)	49.208779 N, 24.703988 E	Зона прямого впливу скиду стічних зі станції. Ділянки поблизу населених пунктів / Zone of direct impact of wastewater discharge from the station. Areas near settlements
6	р. Гнила Липа (нижче с. Бовшів) / Nnyla Lyra River (below Bovshiv village)	49.198302 N, 24.714770 E	Зона змішування та акумуляції / Mixing and accumulation zone

Продовження таблиці 1 Continuation of table 1			
7	р. Дністер, нижче впадіння р. Гнила Липа (нижче с. Тустань, нижче м. Галич) / Dniester River, below the confluence of the Hnyla Lypa River (below Tustan village, below Halych town)	49.118300 N, 24.754028 E	Зона змішування. Моніторинг кумулятивного ефекту та оцінка якості відкладів транскордонної артерії. 100м нижче за течією після від місця впадіння р. Гнила Липа у р. Дністер для оцінки транзиту забруднювачів /Mixing zone. Monitoring of cumulative effect and assessment of sediment quality of the transboundary artery. 100m downstream after the confluence of the Hnyla Lypa River into the Dniester River to assess the transit of pollutants

Аналітичний етап реалізовано на базі навчально-дослідницької лабораторії аналітичних екологічних досліджень ХНУ імені В. Н. Каразіна (верифіковано протоколами № 2224-30 та № 2208-2214). Визначено гідрохімічні показники, вміст розчинених солей та концентрацій важких металів (Pb, Cd, Cu, Zn) у воді та твердій фазі відкладів методом атомно-абсорбційної спектроскопії.

Для інтерпретації отриманих даних та ідентифікації генезису забруднення було застосовано комплексний математичний апарат, що включає такі показники: індекс геоаккумуляції (I_{geo}), коефіцієнт збагачення (EF), індекс навантаження забруднення (PLI), токсикологічний скринінг (SQGs).

Індекс геоаккумуляції (I_{geo}) використаний для оцінки інтенсивності

антропогенного накопичення металів відносно фонових значень. Для обчислення використана математична модель [13]:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5 \times B_n} \right) \quad (1),$$

де: C_n – виміряна концентрація досліджуваного елемента в зразку;

B_n – геохімічний фон для цього елемента (використовують середній вміст у земній корі, за Кларком, або локальний фоновий рівень).

1.5 – постійний коефіцієнт (фактор корекції), який використовується для мінімізації впливу можливих природних коливань фонових значень, спричинених літологічними особливостями.

За показником I_{geo} визначено ступінь забруднення донних відкладів (табл. 2)

Таблиця 2

Класифікація забруднення [13]

Table 2

Classification of pollution [13]

Значення I_{geo} / I_{geo} value	Клас / Class	Ступінь забруднення / Degree of contamination
≤ 0	0	Практично не забруднено / Virtually unpolluted
$0 < I_{geo} \leq 1$	1	Від не забрудненого до помірно Забрудненого / Non-polluted to moderately polluted
$1 < I_{geo} \leq 2$	2	Помірно забруднено / Moderately polluted
$2 < I_{geo} \leq 3$	3	Від помірно до сильно Забрудненого/ Moderately to heavily polluted
$3 < I_{geo} \leq 4$	4	Сильно забруднено / Heavily polluted
$4 < I_{geo} \leq 5$	5	Від сильно до надзвичайно Забрудненого / Heavily to extremely polluted
> 5	6	Надзвичайно забруднено / Extremely polluted

Критично важливим показником для донних відкладів є коефіцієнт збагачення (Enrichment Factor, EF), що допомагає зрозуміти, чи є цей метал результатом діяльності людини, чи він накопичився через особливості мінерального складу. Для обчислення EF використана математична модель [14, 15]

$$EF = \frac{(C_i/C_{ref})_{sample}}{(C_i/C_{ref})_{background}} \quad (2),$$

де C_i – концентрація металу що досліджується в пробі донних відкладів;

C_{ref} – концентрації референтного елемента в пробі донних відкладів. Для розрахунку елемент-референтом (нормалізатором) обрано титан;

$(C_i/C_{ref})_{sample}$ – відношення концентрації металу що досліджується до концентрації референтного елемента в пробі;

$(C_i/C_{ref})_{background}$ – відношення тих самих елементів у фоні (у кларку земної кори).

Відповідно значень показника EF визначено ступінь збагачення донних відкладів (табл. 3)

Таблиця 3

Ступінь збагачення донних відкладів за значенням показника EF [15]

Table 3

The degree of enrichment of bottom sediments based on the EF index [15]

Значення EF / EF value	Супінь збагачення / Enrichment degree
EF<2	Мінімальне (природне походження) / Minimal (natural origin)
2≤EF<5	Помірне збагачення / Moderate enrichment
5≤EF<20	Значне збагачення / Significant enrichment
20≤EF<40	Дуже високе збагачення / Very high enrichment
EF>=40	Надзвичайно високе збагачення / Extremely high enrichment

Індекс навантаження забруднення (PLI – Pollution Load Index) інтегральний показник, який дозволив оцінити загальний рівень токсичного тиску на донні відклади, враховуючи відразу кілька металів, на усій ділянці дослідження в цілому [16,17]. Для обчислення використана математична модель [16]:

$$PLI = \sqrt[n]{C_{f1} \times C_{f2} \times C_{f3} \dots C_{fn}} \quad (3),$$

де C_{fi} – коефіцієнт забруднення кожного окремого металу (розраховується як $C_{sample}/C_{background}$).

n - кількість металів, що аналізуються.

Розраховані значення показника PLI дозволили встановити ступінь забруднення донних відкладів (табл. 4)

Таблиця 4

Класифікація PLI [17]

Table 4

PLI Classification [17]

Значення PLI / PLI value	Стан донних відкладів / Sediment condition
PLI<1	Забруднення відсутнє / Contamination absent
PLI=1	Межа /Limit
PLI>1	Забруднення присутнє / Contamination present

Для оцінки потенційних токсичних ефектів у донних відкладах водосховища використана міжнародна система Sediment

Quality Guidelines (SQGs). В Україні власні офіційні нормативи ТЕС/ПЕС ще знаходяться на стадії впровадження, тому

використані консенсусні стандарти [18], які є універсальними. ТЕС (Threshold Effect Concentration) – порогова концентрація ефекту, нижче якої негативний вплив на біоту зазвичай не спостерігається; PEC (Probable Effect Concentration) – концентрація ймовірного ефекту, вище якої часто виникають несприятливі біологічні наслідки. Індивідуальну токсичність (TU_i) розраховували для кожного металу за математичною моделлю [18]:

$$TU_i = \frac{C_i}{PEC_i} \quad (4),$$

де PEC_i – ймовірна концентрація ефекту для цього металу;

Перевищення одиничного значення показника TU_i ($TU_i > 1$) свідчить про високу ймовірність виникнення гострих токсичних ефектів, що можуть призвести до летальних наслідків або суттєвих фізіологічних порушень у гідробіонтів. Розраховано середній коефіцієнт SQG ($mSQG-Q$ - Mean Sediment Quality Guideline Quotient) для оцінки сумарної токсичності. Для обчислення використана математична модель [19]:

$$mSQG - Q = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{C_i}{PEC_i} \right)}{n} \quad (5),$$

де n – кількість аналізованих металів.

Аналіз просторово-часових змін здійснено згідно рівня потенціалу токсичності (табл. 5)

Таблиця 5

Показники для визначення рівня потенціалу токсичності [19]

Table 5

Indicators for determining the level of toxicity potential [19]

Параметр / Parameter $mSQG - Q$	Рівень потенціалу Токсичності /Level of toxicity potential
< 0.1	Низький /Low
0.1-1.0	Середній / Medium
> 1.0	Високий / High

Результати та обговорення

Для верифікації отриманих лабораторних даних та встановлення генезису мікроелементів застосовано багатокритеріальний підхід, що включає розрахунок I_{geo} , EF, PLI, визначення індивідуальної токсичності; надання оцінки потенційних екоотоксикологічних ризиків для бентосних біоценозів.

Розрахунок індексу I_{geo} дозволив класифікувати рівень седиментологічного навантаження на досліджуваних створах; відповідні аналітичні дані систематизовано в табл. 6.

Екологічний стан донних відкладів гідрологічної системи оцінювали шляхом порівняння фактичних концентрацій важких металів із їх фоновими значеннями в природних ґрунтах. У басейні р. Гнила Липа поширені сірі опідзолені ґрунти, чорноземи опідзолені, чорноземи глибокі, дерново-підзолисті, дернові, лучні, лучно-болотні, торфовища. На території проведення дослідження найбільш поширені чорноземи опідзолені мало гумусні типові середньо суглинистими (близько 50% площі району дослідження), по долинам річок – лучні і дерново-глейові ґрунти [20].

Аналіз отриманих результатів. Вміст валової форми Pb у ґрунтах м. Бурштин знаходиться у межах від 9.2 до 18.15 мг/кг [21], ГДК - 30 мг/кг, кларк 10 мг/кг [22]. Для розрахунку I_{geo} рекомендовано використовувати локальний фон вмісту важкого металу чи його світовий кларк. В умовах інтенсивного техногенного навантаження Бурштинської ТЕС на регіон, встановлення істинного локального геохімічного фону ускладнюється через транскордонне перенесення чи дифузне забруднення. Тому використання світових кларків у дослідженні виступає об'єктивним еталоном доантропогенного стану. Використання значень кларка відповідає класичному підходу розрахунку I_{geo} , що дозволяє уникнути суб'єктивізму при виборі локальних фонових ділянок, які можуть мати природні геохімічні аномалії. Застосування коефіцієнта 1,5 у формулі I_{geo} зумовлено відповідно до класичної методики Г. Мюллера для нівелювання можливих природних відхилень фонових концентрацій (V_n), спричинених літологічною мінливістю відкладів [13]. Науковці

Таблиця 6

Рівень седиментологічного навантаження (I_{geo}) на створах дослідження

Table 6

Level of sediment load (I_{geo}) at the survey sections

Речовина	Розрахунок $\log_2(C_n / 15)$						
	Створ 1 / Site 1	Створ 2 / Site 2	Створ 3 / Site 3	Створ 4 / Site 4	Створ 5 / Site 5	Створ 6 / Site 6	Створ 7 / Site 7
Свинець	0.64	0.65	2.13	1.84	2.93	2.46	0.67
Кадмій	0.51	0.85	3.80	2.31	1.80	1.47	0.53
Мідь	0.55	0.49	0.77	0.61	0.75	0.64	0.62
Цинк	0.11	0.12	0.72	0.15	0.52	0.23	0.10

використовують саме це значення цього коефіцієнта, який гарантує, що розрахований ступінь забруднення відображає саме антропогенний вплив, а не локальні геологічні особливості. Застосування уніфікованого коефіцієнта забезпечує можливість коректного порівняння отриманих індексів із результатами міжнародних досліджень. Отримані значення I_{geo} Pb для всіх створів коливаються в межах від -0.58 до 0.09. Це свідчить, що рівень накопичення Pb є мінімальним. Хоча перевищення фону (10 мг/кг) фіксується у більшості проб (крім першої), коефіцієнт 1.5 нівелює ці коливання як природні. Лише у створах №3 (Коростовичі) та №5 (Бовшів 1) індекс виходить у позитивну зону (0.09), що формально відносить їх до 1-го класу (початкова стадія забруднення). За вмістом Pb донні відклади системи характеризуються як екологічно благополучні. Навіть у зонах потенційного впливу (водосховище) накопичення металу не досягає токсично значущих рівнів.

Вміст валової форми Cd в межах 0,6-7,5 мг/кг, вміст Cd в земній корі $1,6 \times 10^{-5}$ % [23]. У ґрунтах м. Бурштин вміст Cd у валовій формі складає 2.29-4.14 мг/кг, кларк складає 0,5 мг/кг [21]. Геохімічний аналіз донних відкладів за індексом I_{geo} виявив суттєву антропогенну трансформацію за вмістом Cd в межах акваторії Бурштинського водосховища. На відміну від фонових створів (№1, №2, №7), де показники I_{geo} залишаються від'ємними, у створі №3 (с. Коростовичі) значення індексу досягає 1,93, що відповідає другому класу забруднення («помірно забруднений»).

Таке зростання концентрації Cd (до 2,85 мг/кг) у седиментах центральної частини водосховища вказує на інтенсивне осадження металу в зонах зі зниженою гідродинамічною

активністю. Отримані результати корелюють із даними стану поверхневих вод водосховища після воєнних впливів [12] для Cd, проте амплітуда накопичення Cd є вищою, що робить його пріоритетним чинником екологічного ризику в даній водній системі.

У ґрунтах м. Бурштин вміст Cu у валовій формі складає 6.24-12.25 мг/кг, фоновий вміст 17 мг/кг, [21], кларк складає 20 мг/кг [22]. Аналіз геохімічного статусу донних відкладів за вмістом Cu продемонстрував відсутність техногенного забруднення на всій протяжності досліджуваної водної системи. Встановлені від'ємні значення $I_{geo} < 0$ свідчать, що варіації концентрацій Cu обумовлені переважно природними чинниками седиментогенезу, а не антропогенною емісією. Таким чином, Cu не виступає чинником екоотоксикологічного навантаження для досліджуваної акваторії.

Вміст валової форми Zn у ґрунтах м. Бурштин знаходяться в межах 11,03-28,14 мг/кг [21], фоновий вміст - 60 мг/кг, кларк складає 50 мг/кг [22]. На основі розрахованих I_{geo} встановлено, що Zn підтверджує екологічну стабільність водної системи. Отримані значення I_{geo} на всіх моніторингових створах знаходяться в діапазоні від -3,41 до -0,46 вказують на екологічне благополуччя системи за цим показником. Спорадичне зростання концентрації Zn у центральній частині Бурштинського водосховища (65,4 мг/кг) не призводить до перевищення геохімічного порогу, що дозволяє класифікувати ці відклади як практично не забруднені техногенним Zn. Отримані результати дозволяють стверджувати, що геохімічний цикл Zn в басейні р. Гнила Липа визначається виключно природними літогенними процесами.

Для розрахунку EF (коефіцієнта збагачення) використаний титан (Ti) як нормалізатор, оскільки він є малорухливим і чітко відображає природну мінеральну матрицю. Розрахунок проведено за умови стабільного вмісту Ti (8938 мг/кг [22]) для виявлення антропогенного навантаження. Ti вибрано тому, що він є стабільним природним елементом, який не поглинається живими організмами та не вступає в хімічні реакції при зміні умов у водоймі (наприклад, при зміні рівня кисню чи температури). У досліджуваній зоні впливу теплової електростанції, де спостерігаються значні температурні коливання та зміна хімічного складу вод, використання Ti є більш надійним порівняно з Fe, чия рухливість залежить від кисневого режиму. Такий підхід відповідає методичним рекомендаціям [15] та дозволяє нівелювати вплив неоднорідності мінералогічного складу відкладів, забезпечуючи об'єктивну оцінку антропогенного навантаження.

Результати розрахунків визначили, що Cd – критичний маркер: це єдиний метал, який демонструє антропогенну складову. У створі №3 (с. Коростовичі) $EF = 5,70$, що класифікується як «значне накопичення». Це прямий доказ техногенного походження Cd в цій точці. Стосовно Pb значення EF коливаються від 1,0 до 1,6. Оскільки $EF < 2$, це вважається мінімальним накопиченням (табл. 2), яке може бути зумовлене природними літологічними особливостями, а не техногенним забрудненням. Стосовно Cu та Zn спостерігаємо, що EF стабільно нижче 2 (а для Zn навіть нижче 1). Це свідчить про те, що вміст цих металів повністю контролюється природними процесами розсіювання. Таким чином, застосування нормалізації за Ti дозволило диференціювати генезис важких металів у системі. Розраховані EF для Pb, Cu та Zn не перевищують порогу 2, що вказує на їх переважно літогенне походження (табл. 3). Натомість для Cd у створі №3 встановлено значну антропогенну складову ($EF = 5,7$), що свідчить про інтенсивне надходження цього металу з зовнішніх джерел та його подальшу акумуляцію у донних седиментах Бурштинського водосховища.

Хоча теоретично не можна повністю виключити локальні природні мікро-аномалії, однозначність антропогенного походження Cd у створі №3 підтверджується методом порівняння. По-перше, для Pb, Cu та Zn у цій же точці значення EF залишаються в межах фонових (менше 2). Це підтверджує, що природна основа дна залишається незмінною, а отже, зростання рівня кадмію не

пов'язане з геологією. По-друге, розрив між природним фоном і показником Cd ($EF = 5,70$) є значним, щоб пояснити його лише літологічними особливостями. Таким чином, у створі №3 спостерігається саме комбінований ефект: інтенсивне техногенне надходження Cd у поєднанні з гідродинамічними умовами даної ділянки, які сприяють його концентруванню у донних відкладах. Нормалізація за Ti якраз і була проведена для того, щоб відсіяти природні чинники. Оскільки для інших металів вона спрацювала і показала природний стан, то для Cd вона показала антропогенну складову.

Зафіксоване значне накопичення Cd у створі №3 ($EF = 5,70$) логічно підтверджується нашими попередніми дослідженнями стану поверхневих вод після воєнних обстрілів [12, 24]. Зокрема, у цій же локації раніше було встановлено екстремальне забруднення водного дзеркала нафтопродуктами (перевищення у 56 разів), а також підвищення рівнів Cd, Fe. Такий збіг не є випадковим. Масивне надходження нафти у водойму внаслідок обстрілів об'єкту критичної інфраструктури створило умови для формування стійких органо-мінеральних комплексів. Нафтові плівки та частинки сажі сприяють швидкому осадженню важких металів з товщі води на дно. Таким чином, сучасний стан донних відкладів у вказаному створі водосховища є результатом двох паралельних процесів: довготривалому впливу теплової електростанції (постійне температурне та хімічне навантаження) та гострого воєнного впливу, який став каталізатором інтенсивної накопичення Cd у донних відкладах. Відділити вплив техногенного навантаження ТЕС і воєнних факторів наразі неможливо, але їх поєднання зумовило перехід Cd до категорії пріоритетних екологічних ризиків для досліджуваної акваторії.

Для розрахунку індексу навантаження (PLI) спочатку було обчислено коефіцієнт забруднення (CF) для кожного металу, для кожного створу дослідження (табл. 7)

Згідно з класифікацією Томлінсона [17] (табл. 3) інтегральна оцінка техногенного навантаження на донну підсистему, проведена за допомогою індексу PLI, виявила зони екологічного ризику в центральній частині Бурштинського водосховища. Встановлено, що значення PLI у створах №3 (1.85) та №5 (1.40) перевищують одиницю, що класифікується як стан антропогенної деградації. Водночас на фонових та замикаючих створах індекс залишається в межах 0.57–

Таблиця 7

Коефіцієнти забруднення для металів на усіх створах дослідження

Table 7

Pollution factors for metals at all monitoring sites

Створ / Sites	CF (Pb)	CF (Cd)	CF (Cu)	CF (Zn)
№1	1.00	0.82	0.84	0.16
№2	1.20	1.28	0.74	0.19
№3	1.60	5.70	1.17	1.09
№4	1.40	3.46	0.91	0.22
№5	1.60	2.70	1.14	0.78
№6	1.50	2.20	0.95	0.14
№7	1.20	0.80	0.93	0.15

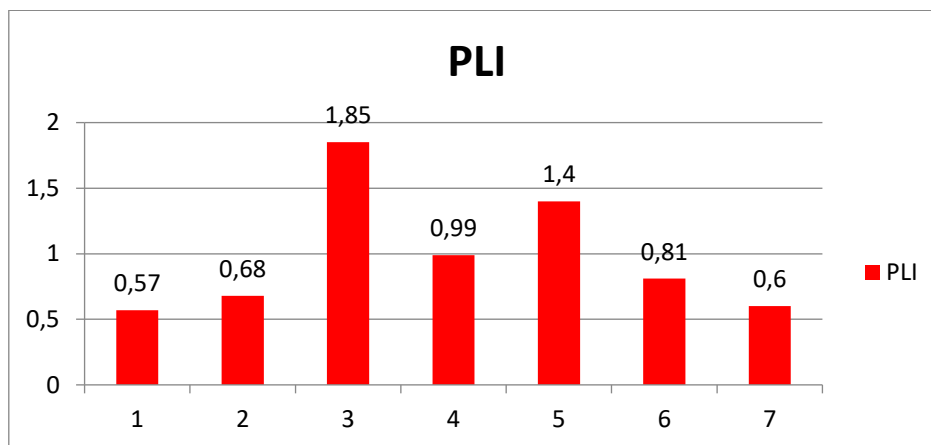


Рис. 2 – Просторовий розподіл індексу забруднення (PLI) для важких металів (Pb, Cd, Cu, Zn) в осаді водної системи (1, 2, ..., 7 – створи дослідження)

Fig. 2 – Spatial distribution of the Pollution Load Index (PLI) for heavy metals (Pb, Cd, Cu, Zn) in the sediment of the studied aquatic system (1, 2, ..., 7 – study sites)

0.81, що підтверджує локальний характер забруднення, зумовлений передусім високою акумуляцією Cd та Pb (рис. 2).

Просторовий розподіл PLI (рис. 2) чітко демонструє локалізацію зони седиментогенного ризику. Найвищі значення PLI (1.85 та 1.40) зафіксовано на створах №3 та №5, що вказує на стан антропогенної деградації (де $PLI > 1.0$). На відміну від цього, на фоновому створі №1 та замикаючому створі №7 значення індексу залишаються в задовільному діапазоні (< 0.70), що свідчить про ефективність седиментації металів у межах Бурштинського водосховища та відсутність переносу забруднювачів.

Для того, щоб зрозуміти чи є вміст металу потенційно летальним для донних організмів, було розраховано індивідуальну

токсичність (TU). Для цього були використані встановлені значення PEL (мг/кг) згідно з міжнародними нормативами [19]: Pb 91,3 мг/кг, Cd 3,53 мг/кг, Cu 197,0 мг/кг, Zn 315,0 мг/кг. Розрахунок TU показав, що вміст досліджуваних важких металів у донних відкладах гідросистеми знаходиться нижче порогових значень PEL. Попри зафіксоване антропогенне накопичення, значення TU для всіх елементів не перевищували одиницю. Найвищий токсичний потенціал виявлено для Cd у створі №3 ($TU = 0,81$). Це вказує на приховане екологічне навантаження, яке за несприятливих гідрохімічних умов може трансформуватися в реальну загрозу для бентосних біоценозів.

Для оцінки сумарної токсичності розрахований коефіцієнт SQG. Інтегральна

оцінка якості донних відкладів за показником $mSQG-Q$ дозволила встановити ймовірність прояву негативних біологічних ефектів. Розраховані значення варіюють від 0,08 до 0,32, що в цілому відповідає низькому та помірному рівням екотоксикологічного ризику. Максимальне значення коефіцієнта зафіксовано в зоні акумуляції с. Коростовичі (0,32), що вказує на зростання біологічної небезпеки внаслідок синергетичного ефекту накопичених важких металів та потребує постійного моніторингу, оскільки сукупне навантаження на бентосні біоценози є суттєво вищим за природний фон.

Зв'язок між розрахованими геохімічними індексами та біотичними наслідками розкрито достатньо повно через застосування методології SQGs. Використання порогових значень PEL дозволило встановити, що хоча концентрації металів не досягли рівня загибелі організмів ($TU < 1$), вони перебувають у зоні "прихованого навантаження". Найвищий показник TU для Cd (0,81) у створі №3 є критично близьким до одиниці. Це науково обґрунтовує ризик виникнення хронічної токсичності, що може проявлятися у зниженні репродуктивної здатності бентосних організмів та порушенні трофічних ланцюгів, навіть за відсутності миттєвого летального ефекту.

Застосування багатокритеріального підходу (Igeo та EF) дозволило встановити, що вміст Cu та Zn у донних відкладах визначається виключно природними літогенними процесами. Для Pb зафіксовано початкову стадію антропогенного впливу на окремих створах, проте його концентрації залишаються в межах екологічно безпечних значень.

Встановлено суттєву техногенну трансформацію донних відкладів за вмістом Cd. У центральній частині Бурштинського водосховища (створ №3, с. Коростовичі) виявлено значне антропогенне збагачення (EF = 5,7) та рівень «помірного забруднення» (Igeo = 1,93). Це вказує на інтенсивне надходження металу з зовнішніх джерел та його акумуляцію в зонах зі зниженою гідродинамічною активністю.

Інтегральна оцінка за індексом навантаження (PLI) чітко локалізує зону седиментогенного ризику в межах акваторії водосховища (створи №3 та №5, де $PLI > 1$). Водночас

Інтегральний показник $mSQG-Q$ враховує не лише концентрацію окремих металів, а й їхню синергетичну дію. Значення 0,32 у створі №3 вказує на помірну ймовірність прояву негативних біологічних ефектів, що є достатнім підґрунтям для прогнозування змін у структурі бентосних біоценозів.

Акцент на потенційній небезпеці не є перебільшенням, оскільки значення TU для Cd (0,81) лише на 19% віддалене від межі ймовірної летальної дії (PEL). У динамічних екосистемах, якими є водосховище-охолоджувач теплової електростанції, такий запас міцності є мінімальним і може бути вичерпаний за короткий проміжок часу. Донні відклади є депонентами забруднення. За відносно низької поточної токсичності вони залишаються джерелом вторинного забруднення. Будь-яка зміна гідрохімічного режиму (зниження рН, температурні коливання від енергоблоків або збурення осадів) може призвести до переходу Cd у біодоступну форму, різко збільшуючи реальну токсичність. Низькі значення сумарної токсичності часто не враховують ефект біокумуляції. Cd має здатність накопичуватися в тканинах гідробіонтів протягом життя. Таким чином, навіть "помірний" рівень забруднення донних відкладів призводить до хронічного отруєння ланок трофічного ланцюга.

Висновки

Фонові та замикаючі створи демонструють задовільний стан ($PLI < 0,81$), що свідчить про бар'єрну роль водосховища, яке акумулює забруднювачі та запобігає їх транзитному переносу в р. Дністер.

Розрахунок індивідуальної токсичності (TU) показав, що концентрації металів наразі не перевищують порогових значень PEL. Однак високий токсичний потенціал Cd у центральній частині водосховища ($TU = 0,81$) та інтегральний показник $mSQG-Q$ (0,32) вказують на приховану загрозу та можливість прояву негативних біологічних ефектів за зміни гідрохімічних умов.

Виявлений синергетичний ефект накопичених металів та перевищення фонових показників потребують впровадження регулярного седиментологічного моніторингу Бурштинського водосховища як ключової ланки трансформації міграційних форм важких металів у каскаді досліджуваної гідросистеми.

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

У цьому дослідженні не використовувався генеративний штучний інтелект.

Список використаної літератури

1. Nin C. J., Rodgher, S. Effect of a temperature rise on metal toxicity for the aquatic biota: a systematic review. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 2021. Vol. 56. No 4. P. 10-720. <https://doi.org/10.5327/Z217694781010>
2. Ромась, М. І. *Гідрохімія водних об'єктів атомної і теплової енергетики*: монографія. Київ, ВПЦ Київський університет. 2002.
3. Карлюк, А. А. *Підвищення екологічної безпеки річки Сіверський Донець та озер Лиманської групи в зоні впливу Зміївської ТЕС*. Дисертація кандидата наук. УКРНДІЕП. 2021. URL: http://www.nieep.kharkov.ua/sites/default/files/SpecRada/Dissertation_Karluk.pdf (дата звернення: 30.03.2026)
4. Ричак Т. Л., Архипова Л. М. Еколого -токсикологічна оцінка якості води водойми охолоджувача Бурштинської ТЕС. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*, 2024. Вип.30. С. 91-104. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2024-30-07>
5. Ramalho, F. L., de Barcelos, A. A., Becegato, V. A., Paulino, A. T. Sediments of Hydropower Plan Water Reservoirs Contaminated with Potentially Toxic Elements as Indicators of Environmental Risk for River Basins. *Water*, 2024. Vol.19. 2733. <https://doi.org/10.3390/w16192733>
6. Васенко, О. Г., Верниченко, Г. А., Верниченко-Цветков, Д. Ю., Коваленко, М. С. Розширення переліку показників екологічної класифікації якості поверхневих вод України. *Проблеми охорони навколишнього природного середовища та екологічної безпеки*. 2011. № 33. С. 33-47.
7. Jaskuła, J., Sojka, M. Assessment of Spatial Distribution of Sediment Contamination with Heavy Metals in the Two Biggest Rivers in Poland. *Catena*. 2022. Vol. 211, 105959. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105959>
8. Генерація Бурштинська ТЕС. 2026. <https://join.dtek.com/ua/burstinska-tes/> (дата звернення: 30.03.2026)
9. Івано-Франківська обласна військова адміністрація *Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Івано-Франківській області в 2022 р.* Івано-Франківськ. 2023. https://www.if.gov.ua/storage/app/sites/24/uploaded-files/%D0%94%D0%9E%D0%9F%D0%9E%D0%92%D0%86%D0%94%D0%AC_2023.pdf (дата звернення: 30.03.2026)
10. Івано-Франківська обласна військова адміністрація *Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Івано-Франківській області за 2023 р.* Івано-Франківськ. 2024. <https://www.if.gov.ua/storage/app/sites/24/uploaded-files/regionalna-dopovid-2024.pdf> (дата звернення: 30.03.2026)
11. Rychak, T., Arkhypova, L., Kizilova, N., Vnukova, N., Rychak, N. Patterns of changes in hydrochemical parameters of surface water massifs in the area of influence of a thermoelectric power station. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2025. Vol. 26. N 8. P.187-202. <https://doi.org/10.12912/27197050/207533>
12. Rychak, T., Arkhypova, L. Environmental assessment of the impact of hydrocarbon pollution on the condition of cooling ponds. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*. 2025. Vol. 16. N 1. P. 9-18. <https://doi.org/10.69628/esbur/1.2025.09>
13. Förstner, U., Wittmann, G. T. Metal Pollution in the Aquatic Environment. *Springer Science & Business Media*. Berlin-Heidelberg-New York-Tokyo 2012. https://books.google.co.il/books/about/Metal_Pollution_in_the_Aquatic_Environme.html?id=9PLuCAAQBAJ&redir_esc=y
14. Sutherland, R. A. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environmental Geology*. 2000. Vol. 39. № 6. P. 611-627. <https://doi.org/10.1007/s002540050473>
15. Loska, K., Wiechuła, D., Korus, I. Metal contamination of farming soils affected by industry. *Environment International*. 2004. Vol. 30. № 2. P. 159-65. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(03\)00157-0](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(03)00157-0)

16. Abraham, G. M. S., Parker, R. J. Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2008. Vol. 136. № 1-3. P. 227-238. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9678-2>
17. Tomlinson, D. L., Wilson, J. G., Harris, C. R., Jeffrey, D. W. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*. 1980. Vol. 33. № 1. P. 566-575. <https://doi.org/10.1007/BF02414780>
18. Angulo, E. The Tomlinson Pollution Load Index applied to heavy metal 'Mussel-Watch' data: a useful index to assess coastal pollution. *Science of the Total Environment*. 1996. Vol.187. №1. C.19-56. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(96\)05128-5](https://doi.org/10.1016/0048-9697(96)05128-5)
19. MacDonald, D., Ingersoll, C. & Berger, T. Development and Evaluation of Consensus-Based Sediment Quality Guidelines for Freshwater Ecosystems. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 2000. Vol.39. P. 20–31 <https://doi.org/10.1007/s002440010075>
20. Приходько, М. М. Наукові основи басейнового управління природними ресурсами (на прикладі річки Гнила Липа). *Вісник Львівського університету. Серія географічна*. 2007. № 34. С. 193 – 200. <https://publications.lnu.edu.ua/bulletins/index.php/geography/article/view/2625/2697>
21. Паньків, З. Забруднення важкими металами ґрунтів міста Бурштин Івано-Франківської області. *Вісник Львівського університету. Серія географічна*, 2007. № 34. С. 189–192 <https://publications.lnu.edu.ua/bulletins/index.php/geography/article/view/2624>
22. Фатєєв А.І., Пашенко Я.В. *Фоновий вміст мікроелементів у ґрунтах України*. Харків. 2003. f
23. Яковенко, О. В., Самчук, А. І., Кураєва, І. В., Манічев, В. Й. Особливості забруднення ґрунтів кадмієм та іншими важкими металами підприємствами кольорової металургії. *Мінералогічний журнал*. 2011. Т. 33. № 2. С. 96-99. https://mineraljournal.org.ua/sites/default/files/sites/default/files/MJ_2_2011.pdf
24. Ричак, Т. Л., Архипова, Л. М. Донні відклади як інформаційний показник потенційного екологічного ризику техногенного навантаження на водний об'єкт: У *Молодіжний екогеофорум – 2025: матеріали конференції* . 2025. С. 69-71. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. URL: https://nung.edu.ua/sites/default/files/2026-01/%D0%B7%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA_%D0%93%D0%B5%D0%BE%D1%84%D0%BE%D1%80%D1%83%D0%BC_2025.pdf

Отримано: 05.04.2026 / Переглянуто: 06.05.2026 / Прийнято: 10.05.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

T. L. RYCHAK,

PhD student in the Department of Ecology

e-mail: taras_rychak@ukr.net

ORCID ID: <https://0009-0002-0848-6327>

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

ASSESSMENT OF HEAVY METAL CONTAMINATION IN BOTTOM SEDIMENTS DUE TO LONG-TERM EXPOSURE TO TPP

Purposes. To assess the geochemical and ecological status of bottom sediments within the “Gnyla Lypa River – Burshtyn Reservoir – Dniester River” hydrological system.

Methods. Field and analytical methods, with a systematic approach to synthesizing the results.

Results. Sediment samples were collected at seven representative sites within the hydrological system. To interpret data on heavy metal content (Cu, Zn, Cd, Pb), the following indicators were used: geoaccumulation index, enrichment factor, pollution index, and toxicological screening. The obtained geoaccumulation index values indicate ecological well-being, and the geochemical cycle of Zn in the Gnyla Lypa River basin is determined exclusively by natural lithogenic processes. The calculated enrichment factor values for Cd at the third section indicate an anthropogenic component. It has been established that the pollution index values at sections No. 3 and No. 5 indicate a state of anthropogenic degradation; at the background and terminal sections, the index indicates the absence of pollution. The highest toxicological screening was detected for Cd at section No. 3, which provides grounds for asserting the presence of a latent ecological load that, under unfavorable hydrochemical conditions,

could transform into a real threat to benthic biocenoses. The calculated values of total toxicity vary within ranges corresponding to low and moderate levels of ecotoxicological risk. The highest value of the coefficient was recorded in the accumulation zone (station No. 3), indicating an increase in biological risk due to the synergistic effect of accumulated heavy metals. The values of the pollution load index and the pollution index indicated that the environmental risk associated with the presence of heavy metals in the bottom sediments of rivers and reservoirs was moderate.

Conclusions. The results of the study are of practical significance for the development of environmental management strategies for the Hnyla Lypa–Dniester river system. The measured levels of heavy metal accumulation in bottom sediments serve as a basis for assessing the ecotoxicological status of the reservoir and predicting the resilience of aquatic ecosystems to anthropogenic impacts.

KEYWORDS: *bottom sediments, aquatic ecosystem, thermal power plant*

Conflict of interest

The author declares that there is no conflict of interest regarding the publication of this manuscript. In addition, the author has fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and duplicate publication.

AI Statement

In this study, generative artificial intelligence was not used.

References

- Nin, C. J., Rodgher, S. (2021). Effect of a temperature rise on metal toxicity for the aquatic biota: a systematic review. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 56(4). 10-720. <https://doi.org/10.5327/Z217694781010>
- Romash, M. I. (2002). *Hydrochemistry of Water Bodies in Nuclear and Thermal Power Generation: Monograph*. Kyiv, Kyiv University Publishing Center
- Karlyuk, A. A. (2020). Improving the Environmental Safety of the Siverskyi Donets River and the Liman Group of Lakes in the Impact Zone of the Zmiiv Thermal Power Plant. Abstract of the Ph.D. dissertation, UKRNDIEP. Retrieved from http://www.nieep.kharkov.ua/sites/default/files/SpecRada/Dissertation_Karlyuk.pdf
- Rychak, T. L. and Arkhipova, L. M. (2024). Ecological and toxicological assessment of water quality in the cooling pond of the Burshtyn TPP. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series "Ecology"*, 30, 91–104. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2024-30-07>
- Ramalho, F. L., de Barcelos, A. A., Becegato, V. A., Paulino, A. T. (2024). Sediments of Hydropower Plan Water Reservoirs Contaminated with Potentially Toxic Elements as Indicators of Environmental Risk for River Basins. *Water*, 19, 2733. <https://doi.org/10.3390/w16192733>
- Vasenko, O. G., Vernichenko, G. A., Vernichenko-Tsvetkov, D. Yu., Kovalenko, M. S. (2011). Expansion of the list of indicators for the ecological classification of surface water quality in Ukraine. *Problems of Environmental Protection and Ecological Safety*, XXXIII, 33–47
- Jaskuła, J., Sojka, M. (2022). Assessment of Spatial Distribution of Sediment Contamination with Heavy Metals in the Two Biggest Rivers in Poland. *Catena*, 211, 105959. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105959>
- Burshtyn Thermal Power Plant. (2026). Retrieved from <https://join.dtek.com/ua/burstinska-tes/>
- Ivano-Frankivsk Regional Military Administration (2023). Regional Report on the State of the Environment in Ivano-Frankivsk Region in 2022. Ivano-Frankivsk. Retrieved from https://www.if.gov.ua/storage/app/sites/24/uploaded-files/%D0%94%D0%9E%D0%9F%D0%9E%D0%92%D0%86%D0%94%D0%AC_2023.pdf
- Ivano-Frankivsk Regional Military Administration (2024). Regional Report on the State of the Environment in Ivano-Frankivsk Oblast for 2023. Ivano-Frankivsk. Retrieved from <https://www.if.gov.ua/storage/app/sites/24/uploaded-files/regionalna-dopovid-2024.pdf>
- Rychak, T., Arkhypova, L., Kizilova, N., Vnukova, N., Rychak, N. (2025). Patterns of changes in hydrochemical parameters of surface water massifs in the area of influence of a thermoelectric power station. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 26 (8), 187-202. <https://doi.org/10.12912/27197050/207533>
- Rychak, T., Arkhypova, L. (2025). Environmental assessment of the impact of hydrocarbon pollution on the condition of cooling ponds. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*, 16 (1), 9-18. <https://doi.org/10.69628/esbur/1.2025.09>
- Förstner, U., Wittmann, G. T. (2012). *Metal Pollution in the Aquatic Environment*. Springer Science & Business Media. Berlin-Heidelberg-New York-Tokyo. Retrieved from https://books.google.co.il/books/about/Metal_Pollution_in_the_Aquatic_Environme.html?id=9PLu-CAAQBAJ&redir_esc=y

14. Sutherland, R. A. (2000). Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environmental Geology*, 39 (6), 611-627. <https://doi.org/10.1007/s002540050473>
15. Loska, K., Wiechula, D., Korus, I. (2004). Metal contamination of farming soils affected by industry. *Environment International*, 30(2), 159-65. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(03\)00157-0](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(03)00157-0)
16. Abraham, G. M. S., Parker, R. J. (2008). Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand. *Environmental Monitoring and Assessment*, 136(1-3), 227-238. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9678-2>
17. Tomlinson, D. L., Wilson, J. G., Harris, C. R., Jeffrey, D. W. (1980). Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 33(1), 566-575. <https://doi.org/10.1007/BF02414780>
18. Angulo, E. (1996). The Tomlinson Pollution Load Index applied to heavy metal 'Mussel-Watch' data: a useful index to assess coastal pollution. *Science of the Total Environment*, 187(1), 19-56. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(96\)05128-5](https://doi.org/10.1016/0048-9697(96)05128-5)
19. MacDonald, D. D., Ingersoll, C. G., Berger, T. A. (2000). Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 39(1), 20-31. <https://doi.org/10.1007/s002440010075>
20. Prykhodko, M. M. (2007). Scientific Foundations of Basin-Wide Natural Resource Management (Using the Example of the Hnyla Lypa River): *Bulletin of Lviv University. Geography Series*, 34, 193–200. Retrieved from <https://publications.lnu.edu.ua/bulletins/index.php/geography/article/view/2625/2697>
21. Pankiv, Z. (2007). Heavy Metal Pollution of Soils in the City of Burshtyn, Ivano-Frankivsk Region. *Bulletin of Lviv University. Geography Series*, 34, 189–192. Retrieved from <https://publications.lnu.edu.ua/bulletins/index.php/geography/article/view/2624>
22. Fateev, A. I., Pashchenko, Y. V. (Eds.) (2003). Background content of trace elements in the soils of Ukraine. Kharkiv
23. Yakovenko, O. V., Samchuk, A. I., Kuraeva, I. V., Manichev, V. Y. (2011). Features of soil contamination with cadmium and other heavy metals by non-ferrous metallurgy enterprises. *Mineralogical Journal*, 33(2), 96–99. Retrieved from https://mineraljournal.org.ua/sites/default/files/sites/default/files/MJ_2_2011.pdf
24. Rychak, T. L., Arkhipova, L. M. (2025). Bottom sediments as an indicator of potential environmental risk from anthropogenic loading on a water body. Proceedings of the Conference Youth Eco-Geo Forum – 2025, (pp. 69–71). Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. 2025. Retrieved from https://nung.edu.ua/sites/default/files/2026-01/%D0%B7%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA_%D0%93%D0%B5%D0%BE%D1%84%D0%BE%D1%80%D1%83%D0%BC_2025.pdf

Submission received: 05.04.2026 / Revised: 06.05.2026 / Accepted: 10.05.2026 / Published: 30.05.2026

<https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-10>

УДК (UDC): 504.6:621.313.12:613.164 (477.53)-21

Т. М. АЛЕКСЄЄВА, канд. географ. наук, доц.,
Доцент кафедри практичної психології та реабілітаційних технологій
e-mail: tatiananikolaiivna19@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5671-7372>
Комунальний заклад вищої освіти
«Кременчуцька гуманітарно-технологічна академія» Полтавської обласної ради
вул. Валентини Федько, 33, м. Кременчук, Україна

ШУМ ГЕНЕРАТОРІВ ЯК ЧИННИК ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ І СТАН ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ (НА ПРИКЛАДІ М. КРЕМЕНЧУК)

Мета. Дослідження шумового впливу працюючих генераторів на екологічні умови міського середовища і стан здоров'я населення на прикладі центральної частини м. Кременчук для його зменшення.

Методи. Аналіз, синтез, порівняння, анкетування, математичний, картографічний, графічний.

Результати. В центральній частині Кременчука встановлено генератори переважно невисокої потужності, серед яких бензинові генератори, не оснащені захисним кожухом; дизельні моделі такої самої потужності без захисного кожуху; бензинові генератори невисокої потужності без кожуху; інверторні моделі; бензинові генератори різної потужності, оснащені захисним кожухом. В центрі Кременчука сформувалися зони з високою кількістю генераторів, де рівень шуму не відповідає гігієнічним нормам, що є неприпустимим, оскільки в районі розміщено житлові забудови, багато освітніх, медичних, рекреаційних об'єктів. Генератори встановлені на відстані від 1 до 2-3 м від пішохідної зони, що спричиняє негативний вплив на населення. Відстань між ними незначна, тому їх зони впливу поєднуються. Вивчення впливу шуму генераторів на якість сну людини показало, що він постійно чи часто заважає повноцінно відпочивати вночі. Вивчення шумового впливу генераторів на здатність концентрувати увагу показало, що на роботі постійно виникали проблеми з концентрацією уваги. Шум генератору спричиняє у людини дратівливість, створює відчуття дискомфорту.

Висновки. Для зменшення негативного шумового впливу генераторів на міське середовище і здоров'я населення пропонується встановлювати інверторні генератори або інші моделі, оснащені захисним кожухом, вибирати оптимальні місця для їх розміщення, покращувати шумоізоляцію житла, здійснити юридичне обґрунтування застосування генераторів для захисту інтересів жителів міста.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: генератор, шумове забруднення, гігієнічні умови, ментальне здоров'я

Як цитувати: Алексєєва Т. М. Шум генераторів як чинник впливу на довкілля і стан здоров'я людини (на прикладі м. Кременчук). *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2026. Вип. 45. С. 124–136. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-10>

In cites: Alekseeva, T. M. (2026). Generator noise as a factor influencing the environment and human health (on the example of Kremenchuk). *Man and Environment. Issues of Neoecology*, (45), 124–136. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-10> (in Ukrainian)

Вступ

Особливістю зимового періоду 2025-2026 років в Україні було широке застосування генераторів з тієї причини, що споживачі отримували електроенергію по 4-5 годин на добу. Вся країна, у тому числі й Кременчук, жили за графіками відключень електроенергії. З одного боку альтернативні джерела електропостачання давали можливість українцям долати темряву, працювати під час вимкнень електроживлення, що

спричинені російською агресією. З іншого боку генератори чинять вплив на екологічний стан навколишнього середовища, у тому числі створюють шумове забруднення, погіршуючи гігієнічні умови проживання і праці населення.

Шум негативно впливає на стан здоров'я населення, в першу чергу на органи слуху. Підвищені рівні шуму спричиняють постійне їх напруження, що підвищує поріг чутливості,

© Алексєєва Т. М., 2026



This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

тому людина не може розрізнити звуки і окремі слова і витрачає на це додаткові зусилля і енергію. Постійний шум спричиняє вплив на сприймальний апарат слухового аналізатору, що може виходити з ладу і призводити до туговухості. Шумове забруднення негативно впливає також на стан центральної нервової, ендокринної, серцево-судинної систем [1].

Раніше вже вивчалася шумове забруднення міського середовища від промислових підприємств, автомобільного транспорту. Географія таких досліджень досить широка. Так, шумове забруднення довкілля, створене автомобільним транспортом, у Києві у порівнянні з європейськими містами, вивчалася Піскуною Л.Е., Сербенюк Г.А., Голіченко Н.Б. [2] Особливості шумового забруднення центральної частини Львова вивчали Гринчишин Н.М., Шуплат Т.І., Жоріна О.О. [1], Хмельницького - Міронова, Н. Г., Морозов, А. В., Морозова, Т. В. [3].

У Полтаві такі дослідження проводила Степова О.В. [4], в Одесі - Полетаєва Л.М., Сафранов Т.А., Житкевич Я.Я [5]. Дослідження шумопоглинальних властивостей рослин з метою зниження рівнів шумового забруднення проводили Максимцев С.І., Дударець С.М. [6]. Питання адміністративно-правового регулювання шумового впливу автомобільного транспорту на стан природного середовища і здоров'я населення висвітлено у наукових працях Бакутіна Є.І. [7].

Способи оцінки шумового навантаження міського середовища розглянуто у статтях Михайлюк Ю.Д. [8]. Застосування методів геоінформаційного оцінювання і картографування рівнів шуму обґрунтовано Корогодою Н.П., Купач Т.Г. [9].

Методи та методика дослідження

Застосовано методи наукового дослідження: аналіз, синтез, порівняння, анкетування, математичний, картографічний, графічний.

В якості району дослідження вибрано центр м. Кременчук з огляду на те, що тут встановлено велику кількість альтернативних джерел електроживлення. В центрі міста знаходиться його ділова частина: торгівельні організації (ринки, супермаркети, міський будинок торгівлі), адміністративні установи, центри надання послуг населенню (банківські структури, аптеки, медико-діагностичні центри, залізничний і автовокзали, перукарні, розважальні центри, поштові відділення, офіси,

Незважаючи на проведені раніше дослідження з питань шумового забруднення навколишнього середовища, зараз бракує робіт, присвячених впливу джерел альтернативного електропостачання на природне середовище. Якщо вивчення впливу генераторів на стан атмосферного повітря стало об'єктом уваги наукової спільноти [10], то шумовий їх вплив залишився недостатньо дослідженим. Даний напрям досліджень є зараз актуальним, оскільки значна частина об'єктів енергетичної інфраструктури зруйнована внаслідок атак російського агресора. Менша їх частина функціонує, але в будь-який момент також може бути пошкоджена ворогом, тому в умовах воєнного стану генератор залишається важливим джерелом електроживлення, який працює по 3-5 годин поспіль.

Мета роботи – дослідження шумового впливу працюючих генераторів на екологічні умови міського середовища і здоров'я населення на прикладі центральної частини м. Кременчук для його зменшення.

Для досягнення такої мети розв'язувались наступні завдання:

- Вивчення технічних характеристик генераторів, що визначають рівень шуму, їх видів, переваг.
- Дослідження рівня шуму від генераторів на прикладі центральної частини м. Кременчук і його впливу на екологічні умови проживання і роботи населення.
- Дослідження впливу шуму від працюючих генераторів на психоемоційний стан населення.
- Рекомендація заходів щодо зменшення впливу шуму від генераторів на екологічний стан району дослідження і населення.

центри надання адміністративних послуг, громадського харчування, спортивні клуби), освітні установи (заклади загальної середньої і дошкільної освіти, приватні школи і центри розвитку, дитяча художня і спортивна школи, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського). Окрім того тут знаходяться рекреаційні (Придніпровський парк, сквери, пляж) і культурні об'єкти (краєзнавчий музей, палац культури, бібліотеки, галерея), житлові будови, що робить район дослідження місцем перебування великої кількості людей.

На початковому етапі роботи взято на облік генератори, встановлені у центральній

частині м. Кременчук: зафіксовано назву установи, що встановила генератор і її адресу, тип генератору за паливом, його марку, потужність. Окрім того встановлено наявність (або відсутність) захисного кожуху, визначено відстань від місця встановлення генератору до споруди а також до пішохідної зони.

Місця розташування генераторів позначені на карті центральної частини м. Кременчук, проаналізовано співвідношення різних типів генераторів.

Наступний етап дослідження вивчення технічних характеристик генераторів, встановлених у центральній частині міста. За технічною документацією визначено рівні шуму, що створюють генератори, встановлені в районі дослідження. Також проаналізовано різні типи генераторів з точки зору створеного ними рівня шумового забруднення, зручності у застосуванні, економічності, можливих ризиків в ході експлуатації.

Рівень шумового забруднення в центральній частині м. Кременчук визначався розрахунком. Розподіл шумового впливу у довкіллі визначався відповідно до правила звукотехніки, згідно якого для точкових джерел звуку

кожне подвоєння відстані зменшує рівень шуму на 6 дБ [11]. На основі порівняння отриманих результатів з гігієнічними нормативами [12, 13] зроблено висновок щодо якості гігієнічних умов і впливу шумового забруднення на стан здоров'я населення.

Для вивчення рівнів шуму в районі дослідження вибрано три ділянки, де кількість встановлених генераторів виявилася найбільшою. Для цих ділянок створено карти, де відображено рівні шуму за допомогою ізоліній з пошаровим нанесенням відтінків.

Вплив шуму від генераторів на стан ментального здоров'я жителів міста досліджувався на основі опитування, для чого розроблено спеціальну анкету для аналізу впливу шуму на здатність концентрувати увагу, якість сну, виникнення відчуття тривожності, підвищеної дратівливості, дискомфорту. Результати опитування оброблено з використанням статистичних методів.

Завершальним етапом роботи була рекомендація заходів для зниження негативного шумового впливу від працюючих генераторів на екологічний стан міського середовища і здоров'я людини.

Результати дослідження

Генератори є пристроями, що перетворюють механічну енергію на електричну, є джерелом автономного електроживлення під час вимкнень електроенергії. За потужністю генератори поділяють на побутові і промислові.

Побутові генератори, що стали об'єктом уваги в даному дослідженні, мають потужність до 12 кВт і застосовуються для забезпечення роботи котлів, насосів у побуті а також для об'єктів малого бізнесу. Промислові генератори більш високої потужності застосовують на промислових підприємствах.

Паливом для генераторів слугує бензин, дизель і газ. Комбіновані генератори в якості палива використовують бензин і газ. Найменший вплив на екологічний стан природного середовища чинять генератори, які живляться від сонячних панелей. Витрати палива залежать, в першу чергу, від потужності пристрою. Так, бензиновий генератор витрачає у середньому 0,35-0,5 л/кВт·год, дизельний – 0,2-0,4 л/кВт·год [14, 15].

За мобільністю генератори бувають стаціонарні і портативні. Стаціонарні монтується у фундамент і підключаються автоматично, коли потрібно. В районі дослідження були виявлені генератори другої групи –

портативні, які використовуються для освітлення житла і у малому бізнесі.

Бензинові генератори створюють шум до 70 дБ, особливо такі, що мають шумопоглинальний кожух. Пристрої є не дуже складними в експлуатації, запускаються навіть за умови низьких температур і успішно застосовувалися в зимовий період для забезпечення електроенергією протягом нетривалого періоду. Ще однією перевагою бензинових генераторів є їх порівняно невисока вартість, що вплинуло на вибір такої моделі генератору власниками малого бізнесу і приватних будинків в центрі міста.

Головним недоліком бензинових генераторів є неможливість продовжувати експлуатацію після 5-8 годинної роботи, після чого треба зробити паузу. У бензинових генераторів обмежений ресурс, тому термін їх споживання не дуже високий. Рівень споживання палива у них вищий за дизельні генератори, тому собівартість електроенергії досить висока. Генератори такого типу не розвивають високої потужності, тому в промисловості не застосовуються.

Дизельні генератори працюють з більшою потужністю, вони є більш надійними пристроями, мають більш високий ресурс, можуть працювати протягом більш тривалого

терміну без паузи порівняно з бензиновими аналогами. Вони споживають менше палива, що робить їх більш економними. З іншого боку під час роботи вони створюють високий рівень шуму. Вони є більш складними в експлуатації, оскільки запускаються тільки за певних температурних умов. Дизельні генератори є більш вартісними порівняно з бензиновими різновидами (на 20-40 %).

Газові генератори застосовуються не так широко, як бензинові і дизельні. Вони є більш економними, оскільки газ коштує дешевше за бензин або дизельне паливо. Газові генератори не створюють шуму високого рівня, тому їх рекомендують використовувати для житлової забудови. Але це треба робити з обережністю, оскільки газ є вибухонебезпечною речовиною.

Найбільш універсальними видами генераторів вважаються комбіновані, які працюють на бензині і на газовому паливі. Така особливість надає їм можливість працювати на такому паливі, яке є більш досяжним і економним на даний момент часу. Такі генератори досить надійні, працюють зі значними навантаженнями протягом тривалого часу. Менш зручними їх робить складність в експлуатації, технічному обслуговуванні. Окрім того такі різновиди генераторів є більш вартісними і більш вибагливими до якості палива.

Останнім часом більш широкого застосування набувають інверторні генератори, що є джерелом чистого і стабільного

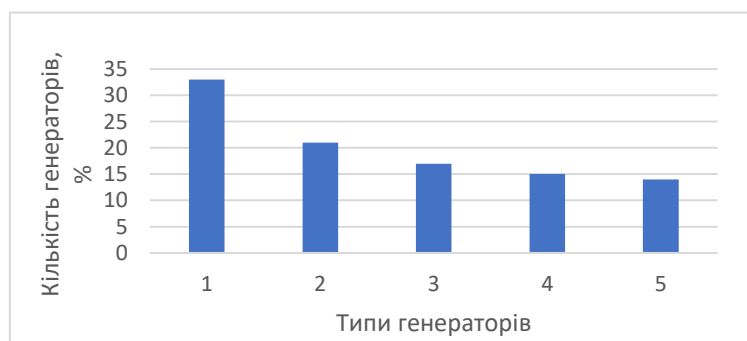
електричного струму, що важливо для організації і установ, де експлуатуються чутливі прилади (медичне обладнання, комп'ютери тощо). Такі моделі генераторів працюють як на бензині, так і на дизельному паливі. Інверторні генератори є компактними пристроями і не створюють шум високого рівня.

В ході роботи взято на облік генератори, встановлені у центральній частині міста Кременчук. Було обстежено вулиці Соборну, Ігоря Сердюка, лейтенанта Покладова, Івана Мазепи, Троїцьку, 29-го вересня, Шевченка, Квартальну, бульвар Української Співдружності та інші.

Найчастіше в районі дослідження застосовуються генератори невисокої потужності 2-3 кВт за виключенням тих випадків, коли мова йде про об'єкти з великою площею (супермаркет «АТБ»), або, коли на об'єкті використовують потужні електричні прилади (електричні духові шафи для виготовлення випічки в кафе «Кулінічі»).

Всього в районі дослідження було взято на облік 75 генераторів. Дослідження показали, що бензинові генератори застосовуються частіше, ніж дизельні. Генераторів інверторного типу виявлено невелику кількість, в якості палива вони застосовують бензин. Серед генераторів району дослідження представлені устрої різних марок: «Limited 3000», «Forester EC 3000», «Konner», «Schonner» та інші.

Як показали дослідження (рис. 1), одна третина всіх генераторів району - це бензинові



1 – бензинові генератори потужністю 2,8-3,0 кВт без захисного кожуху, 2 – дизельні генератори потужністю 2,8-3,0 кВт без захисного кожуху, 3 – інверторні генератори; 4 – бензинові генератори потужністю до 2 кВт без захисного кожуху, 5 – бензинові генератори, оснащені захисним кожухом

Рис. 1 – Типи генераторів, поширених у центральній частині міста Кременчук

1 – petrol generators with a power a power output of 2.8–3.0 kW without a protective enclosure; 2 – diesel generators with a power output 2.8–3.0 kW without a protective enclosure; 3 - inverter generators; 4 - petrol generators with a power a power output to 2 kW equipped with a protective enclosure.

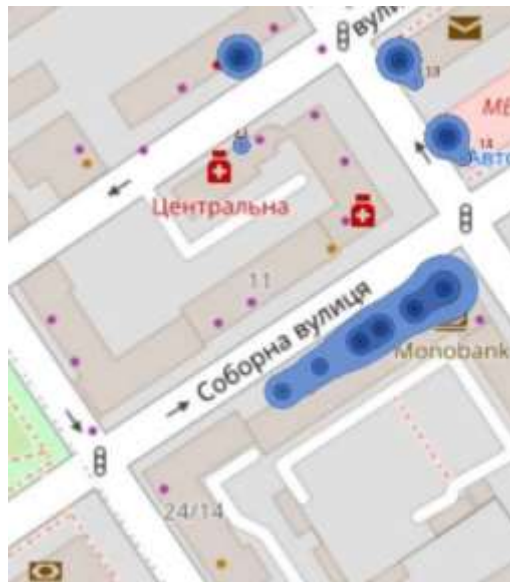
Fig. 1 – Generator types located in the centre of Kremenchuk

генератори потужністю 2,8-3,0 кВт, не оснащені захисним кожухом (33 %). На дизельні генератори без захисного кожуху і з такою

самою потужністю припадає 21 % від усіх генераторів. Виявлено менш потужні бензинові генератори (до 2 кВт) без кожуху у

кількості 15 %. Інверторні моделі генераторів, що працюють на бензині, представлені в центрі Кременчука не дуже широко і складають 17 %. Генератори, що оснащені захисним кожухом виявлені в невисокій кількості – 13 %, куди включені бензинові моделі різної потужності. Газові і комбіновані типи генераторів не виявлено.

Виявлені генератори нанесені на карту-схему, що свідчить про формування ділянок з особливо високою їх кількістю. Саме у межах таких ділянок вивчалися рівні шуму. Одна з таких ділянок розташована у межах вулиць Соборна і Ігоря Сердюка у проміжку між вулицями Шевченка і Небесної Сотні (рис. 2).



Рівень шуму, дБ



Рис. 2 – Рівень шуму від генераторів у центральній частині міста Кременчук

Fig 2 – A generator noise level in the central part of Kremenchuk

В цьому районі розташовано багато торговельних точок («Мега», «Золотий вік», «М'ясна лавка»), кафе, де переважно встановлені бензинові генератори. Дизельні і інверторні моделі представлені мало. Як показано на рисунку 2, найвищі рівні шуму виявлені вдовж проїзної частини вулиці Соборна, де розміщено велику кількість ювелірних і магазинів спортивних товарів. Найпотужніші генератори (3 кВт) тут встановлені на невеликій відстані від пішохідної зони, тому шумовий вплив на населення підвищений. Працюючі генератори розташовуються на незначній відстані один від одного, а це погіршує екологічні умови, оскільки зони їх впливу поєднуються і накладаються одна на одну. Такі ділянки характеризуються підвищеним рівнем шумового забруднення.

Вулиці Соборна і Ігоря Сердюка характеризуються активним рухом автомобільного транспорту, що також створює

шумовий вплив. Якщо взяти до уваги, що в цьому районі окрім магазинів, офісів розміщено житлову забудову, центральну міську бібліотеку, дитячі розвивальні центри, заклади дошкільної освіти, то виникає потреба найшвидшого розв'язання проблеми зниження рівня шуму.

Визначено, що часто генератори встановлені на відстані менше ніж 6 м від споруд, що є порушенням гігієнічних норм, оскільки за таких умов значно підвищується рівень шуму. Іншим видом порушень гігієнічних вимог в центрі міста є випадки роботи генераторів в нічний час.

Друга ділянка з підвищеним рівнем шуму сформувалася в районі бульвару Українського Відродження і вулиці Квартальної, де генератори (переважно бензинові) різної потужності є джерелом електропостачання для магазинів, банківських установ, аптек, діагностичного центру «Арніка», синагоги. Як визначено, інверторні генератори тут

представлені дуже мало (рис. 3), найвищий шумовий вплив створюється в двох проїзній частині бульвару Українського Відродження і в районі медичного центру «Арніка». Максимальні рівні складають 80 дБ і більше, що порушує вимоги Державних санітарних норм допустимих рівнів шуму в приміщеннях житлових і громадських будинків і на території житлової забудови [12].

Згідно даних вимог, в межах територій, що прилягають до магазинів, вокзалів, пунктів прийому підприємств побутового обслуговування рівень шуму не повинен перевищувати 70 дБ.

Визначено, що найвищі рівні шумового впливу утворюються в місцях розміщення бензинових і дизельних генераторів, які не

оснащені захисним кожухом. Такі джерела альтернативного електропостачання встановлюються на відстані від 1 м до 2-3 м від пішохідної зони, тому жителі міста, перебуваючи в цьому районі, потерпають від підвищеного шумового забруднення.

Як вказано раніше, район характеризується досить високим транспортним навантаженням, тому підвищений рівень шуму, створений автотранспортом і працюючими генераторами, негативно впливає на екологічні умови в рекреаційній зоні, яка розташована поблизу.

Найвищі рівні шуму також виявлені в районі медичного центру «Арніка» і міської дитячої спортивної школи (рис. 3), що є дуже небажаним поряд з такими об'єктами. Якщо

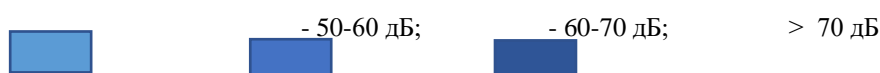
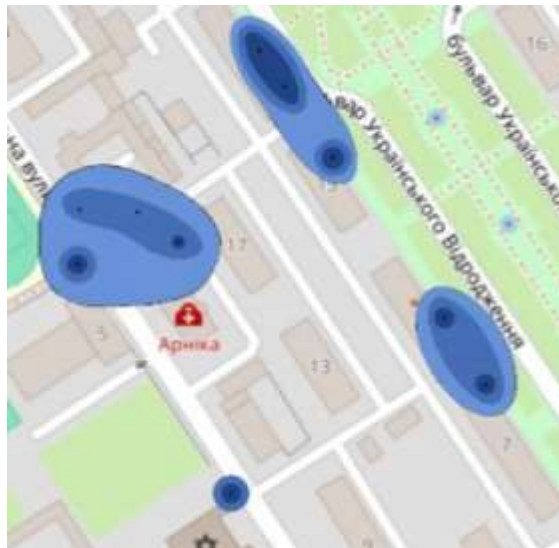


Рис. 3 – Рівень шуму від генераторів у центральній частині міста Кременчук

Fig. 3 – A generator noise level in the central part of Kremenchuk

врахувати, що тут також знаходяться житлові забудови, заклад загальної середньої освіти, будинок дитячої творчості, то проблема загострюється. Ще одна зона з підвищеним шумовим впливом знаходиться в районі синагоги, де розміщений заклад дошкільної освіти.

Третя зона, де зосереджено значну кількість генераторів, утворилась в районі вулиць Академіка Маслова. Тут розташовано торговельні і банківські структури, офіси, пункти надання побутових послуг, центри розвитку для дітей. Як показали дослідження, тут переважають бензинові і дизельні генератори без захисного кожуха. Інверторних генераторів тут не виявлено. На цій ділянці генератори

розташовані на невеликій відстані один від одного, в результаті їх зони впливу об'єднуються і створюють рівень шуму вищий, ніж 60 дБ. Як і в попередніх випадках, генератори розташовані біля стін будинків, що посилює шумовий вплив на пішоходів. Ширина проїзної частини і тротуарів в центрі Кременчука невелика, тому шумове забруднення поширюється в обмеженому просторі.

Треба відмітити, що в районі завжди великий наплив людей, оскільки тут розміщено житлову забудову, крупні супермаркети, комунальне медичне підприємство «Центр первинної медико-санітарної допомоги», станція переливання крові, протитуберкульозний

диспансер, школи дитяча художня і іноземних мов, заклади дошкільної освіти, приватні школи. Тому шумове забруднення впливає на найбільш вразливі категорії населення: дітей і тих, хто потребує медичної допомоги.

Між районами, де вивчався рівень шуму, багато спільного: насиченість міською інфраструктурою, наявність житлової забудови, великі скупчення людей, висока кількість переважно бензинових генераторів без захисних кожухів, розміщення генераторів біля стін споруд на незначній відстані один від одного і від пішохідної зони, інтенсивний рух автотранспорту, обмежений простір поширення шумового впливу.

В роботі вивчався вплив шуму на стан здоров'я людини. Раніше проведені дослідження в цій галузі показали, що в першу чергу шум спричиняє зміни у органах слуху, які супроводжуються підвищенням порогу чутності. Під впливом шуму може відбуватися маскування або заглушення одних звуків іншими [16]. Перша реакція органів слуху на шум - функціональна адаптація з підвищенням порогом чутності, яка є зворотнім явищем, оскільки органи слуху повертаються до норми після нетривалого відпочинку у тиші. Під час втоми органів слуху високий рівень шуму спричиняє більш глибокі зміни, що може привести до розладу функцій. Шум впливає на роботу серцево-судинної системи, спричиняє підвищення артеріального тиску, може спричинити інфаркт міокарду, інсульт, порушення ритму серцевих скорочень. Працівники, що постійно знаходяться під впливом шуму скаржаться на головний біль, запаморочення, поганий апетит, у них можуть розвинутися дисфункції зору, нюху, смаку. Такі працівники постійно перебувають у стані збудження, у них порушується нервово-психічна рівновага, що призводить до захворювань нервової системи, у першу чергу до неврозів.

Досліджено вплив шуму на емоційно-психічний стан людини шляхом опитування проведеного протягом січня 2026 року: опитано 40 респондентів віком від 20 до 65 років з різним станом здоров'я. Серед учасників опитування переважали представники жіночої статі (70 %). Анкетування було проведено серед людей, що працюють в установах центру Кременчука, де встановлено генератори, та жителів міста, що мешкають поруч з такими організаціями. Для проведення опитування за допомогою онлайн-редактору створено електронну форму, яку надсилали респондентам у вигляді посилань. Попередньо з

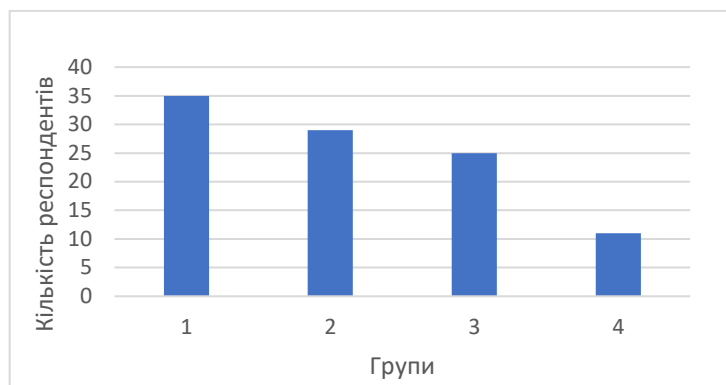
учасниками анкетування проводили бесіду для пояснення мети опитування.

Проведені раніше дослідження показали, що шум негативно впливає на залози внутрішньої секреції, наслідком чого є утворення гормону кортизолу корою наднирників. Тривале перевищення норм кортизолу призводить до підвищення тиску, порушенню імунітету, обміну речовин і сну, коли людині важко заснути, вночі трапляються пробудження, сон часто буває поверхневий. Навіть короткі шуми під час сну людини знижують якість сну. Неповноцінний сон призводить до недостатнього відпочинку нервової системи, хронічної перевтоми, людина зранку не відчуває себе бадьорою і просинається вже втомленою [17]. Недосипання створює у людини відчуття виснаженості.

Дослідження впливу генераторів на якість сну показало, що для майже третини респондентів (35 %) шум не створює перешкоди для засинання (рис. 4). Можливо, це пов'язано з тим, що генератори працюють протягом робочого дня і випадки застосування генераторів ввечері трапляються нечасто. 29 % серед опитаних (переважно молодих людей) вважають, що шум іноді заважає їм спати. 11 % поскаржились на те, що шум їм часто заважає заснути. Четверть респондентів (25 %) повідомили про те, що шум постійно негативно впливає на процес засинання.

Проведені дослідження показали, що шум від генераторів не дає можливості ефективно працювати, концентрувати увагу. Навіть не дуже сильний шум відволікає працівників від роботи, знижує працездатність, заважає процесу мислення. Зниження працездатності спричиняється швидким втомленням робітників. Дослідження [16] показують, що під впливом шуму зростають енергетичні затрати організму для виконання роботи, тобто вона виявляється для людини більш важкою, ніж така сама робота, виконана в умовах тиші. Шум постійно відволікає робітників від розв'язування завдань, а для того, щоб знову зосередитись на робочому питанні, людині потрібно прикласти додаткові зусилля і витратити багато енергії. У зв'язку з цим нервова система швидко стомлюється, виснажується, що може перейти у хронічну перевтому.

Особливо це стосується робітників розумової праці, сфери ІТ, офісних робітників, представників творчих професій. Шумовий вплив є причиною простоїв на робочому місці та подовження реакції (особливо час вибору). Шум заважає процесам вербального



1 – респонденти, яким шум генераторів не заважає спати; 2 – респонденти, яким шум іноді заважає спати; 3 – респонденти, яким шум генераторів постійно заважає спати, 4 – респонденти, яким шум генераторів часто заважає спати

Рис. 4 – Вплив шуму від генераторів на якість сну мешканців м. Кременчук

1 – respondents, whom a generator noise does not prevent from sleeping; 2 - respondents, whom a noise sometimes prevents from sleeping; 3 - respondents, whom a generator noise constantly prevents from sleeping; 4 - respondents, whom a generator noise often prevents from sleeping;

Fig. 4 – A generator noise impact on the sleep quality of residents of Kremenchuk

обміну інформацією, що буде примушувати людей розмовляти гучніше, а це в свою чергу буде підвищувати рівень шуму. Проведені раніше дослідження [18] свідчать про те, що в умовах наростання виробничого шуму знижується працездатність офісних робітників, що працюють з комп'ютерною технікою. Треба підкреслити, що для розв'язування складних виробничих завдань така тенденція є більш вираженою (30%), ніж для вирішення простіших питань (22%). Даний факт пояснюється тим, що складні завдання вимагають більшої концентрації уваги, напруження та розумового навантаження, а підвищений рівень шуму заважає цим процесам. Також зростає кількість допущених помилок, а це вимагає додаткового часу для того, щоб перевірити роботу та виправити їх.

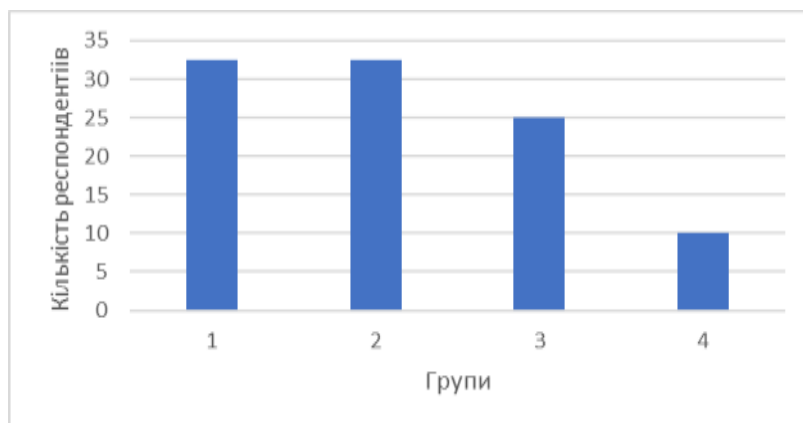
Шум є несприятливим чинником навчального середовища. Дослідження Оніщук І.П. [19] показали, що в умовах підвищеного шумового навантаження спостерігається зростання адаптаційного потенціалу у здобувачів освіти, що вказує на напруженість біологічних механізмів адаптації. В даній роботі виявлено кореляцію між рівнем шумового дискомфорту і рівнем тривожності.

Проведено дослідження впливу шуму від генератору на здатність концентрувати увагу під час роботи, навчання. Так, однакова кількість учасників опитування (по 32,5%) іноді і постійно відчуває, що шум заважає зосередитись на робочих завданнях, відволікає

від роботи, яка вимагає обмірковування, підвищеної уваги, активного мислення (рис. 5). 25% респондентів повідомили про часті випадки, коли шумовий вплив від генератору знижує концентрацію уваги. Треба підкреслити, що серед таких респондентів багато молодих людей. Незначна кількість учасників опитування проінформувала про те, що шум генератору не заважає концентрувати увагу на робочих питаннях і не впливає на працездатність.

Шум під час роботи може стати причиною підвищеної дратівливості, неспокою, відчуття напруження, що також заважає ефективно працювати. Внаслідок цього в колективі можуть виникати конфлікти, які відволікають від роботи, погіршують психологічний клімат у трудовому колективі. Аналіз результатів анкетування показав, що 18% респондентів під впливом шуму генераторів постійно відчували дратівливість. 25% повідомили, що такий стан у них виникав досить часто. Найбільш чисельною групою (39%) були учасники анкетування, які іноді відчували дратівливість. 18% опитаних вважали, що вплив шуму не спричиняв у них підвищеної дратівливості.

Під впливом шуму у людини може виникати відчуття дискомфорту, тривожності, вона перестає відчувати себе затишно. Опитування показало, що 25% опитаних постійно відчували дискомфорт під впливом працюючих генераторів. 35,7% повідомили,



1 – респонденти, яким шум генераторів постійно заважає концентрувати увагу на робочому місці; 2 – респонденти, яким шум іноді заважає концентрувати увагу; 3 – респонденти, яким шум генераторів часто заважає концентрувати увагу, 4 – респонденти, яким шум генераторів не заважає концентрувати увагу

Рис. 5 – Вплив шуму від генераторів на здатність концентрувати увагу

1 – respondents, whom a generator noise constantly prevents from concentration at work; 2 – respondents, whom a noise sometimes prevents from concentration at work; 3 – respondents, whom a generator noise often prevents from concentration at work; 4 – respondents, whom a generator noise does not prevent from concentration at work

Fig. 5 - A generator noise impact on the concentration ability

що такий стан виникав у них іноді. 17,9 % скаржилися на часте відчуття дискомфорту. 21,4 % мешканців міста, вважають, що відчуття дискомфорту під впливом шуму генераторів у них не виникало.

Порівняння отриманих результатів з проведеними раніше дослідженнями [12] показало розширення діапазону шкідливих впливів на ментальне здоров'я людини - виникнення дратівливості, відчуття дискомфорту.

Згідно «Санітарних норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку ДСН 3.3.6.037-99» [13] рівні шуму на робочих місцях, де головними видами діяльності є «творча діяльність, керівна робота з підвищеними вимогами ... наукова діяльність, програмування, викладання та навчання, лікарська діяльність» не повинні перевищувати 50 дБ.

Згідно Додатку 1 до «Державних санітарних норм допустимих рівнів шуму в приміщеннях житлових і громадських будинків та на території житлової забудови» [12], рівень шуму на «території, що безпосередньо прилягають до житлових об'єктів, поліклінік, амбулаторій, диспансерів ... дитячих дошкільних закладів, шкіл, бібліотек ... музеїв» вдень не повинен перевищувати 55 дБ, вночі – 45 дБ. На «території, що прилягають безпосередньо до офісних будівель» такий показник не може перевищувати 65 дБ. Тому актуальним завданням є визначення основних

напрямів зниження впливу шуму генераторів на екологічні умови міського середовища і здоров'я людини.

Важливою проблемою є зниження рівня шуму у самому його джерелі. Не треба обирати генератори, які створюють найвище шумове забруднення – дизельні і бензинові. Краще обирати інверторні моделі. Важливо, щоб генератор був оснащений глушником, що знижує рівень шуму на 10-15 дБ.

Менший шумовий вплив здійснюють закриті моделі генераторів (на 15-20 дБ). Однак, відкриті генератори на рамі залишаються більш популярними завдяки нижчій вартості і простоті у застосуванні. Якщо у генератора не передбачений корпус, то його можна зробити самостійно. Металевий корпус, оббитий зсередини шумозахисним матеріалом, робить генератор менш небезпечним і більш довговічним. Зниженню рівня шуму сприяє використання акустичних килимків і пінопластових блоків. Коливання генератору, що створюють шум і вібрацію, можна зменшити шляхом встановлення демферних пружин. Додаткова ізоляція створюється, якщо генератор буде обкладений мішками з піском.

Важливим є вибір оптимального місця для розміщення генератору. Він має бути розташований на відстані не ближче, ніж 6 м від стіни будинку. Не варто встановлювати генератор біля вхідної двері в під'їзд, офіс тощо, краще розмістити його з торцевого боку

споруди, але не під вікнами квартир, де мешкають люди. Треба, щоб місце, де розміщений устрій, добре провітрювалось. Не можна встановлювати генератор в арках, під'їздах, підсобних помешканнях, оскільки там буде накопичуватись чадний газ.

Для зменшення шуму можна встановити на генераторі еко-режим, для якого характерно менше обертання двигуна, нижче вироблення енергії. Беручи до уваги, що справний апарат створює менший рівень шуму, треба забезпечити генератору відповідне технічне обслуговування і додержання вимог щодо його експлуатації.

Оскільки генератор став важливою частиною міського простору, то питання його

застосування мають бути затверджені юридично для захисту інтересів жителів міста.

Кременчуківцям, особливо з дітьми, можна рекомендувати не відпочивати поруч з працюючими генераторами. Мешканцям міста треба попіклуватися про шумоізоляцію, встановити пластикові вікна. По можливості треба розмістити місце для сну якомога далі від джерела шуму. Приймаючи до уваги, що шум розсіюється під впливом рослин, треба озеленяти місто [20, 21] і розміщувати рослини на балконах будинків. Для підтримання сну людині можна застосовувати полімерні або силіконові беруші. Для заспокоєння ефективними є техніки релаксації і виконання дихальних вправ.

Висновки

Шум від генераторів є важливим чинником впливу на екологічний стан міського середовища. В центральній частині Кременчука найбільш поширеними моделями, які створюють значне шумове навантаження, є генератори, що працюють на бензині і, у меншому ступені, дизельному паливі. Інверторні генератори, що працюють на бензині і створюють шум меншого рівня, представлені у районі дослідження мало.

В центрі міста виявлені зони, де кількість встановлених генераторів найбільша і рівень шумового забруднення найвищий. Визначені тут рівні шуму перевищують гігієнічні показники для території, що прилягають до житлових будинків, дитячих, медичних закладів, культурних об'єктів.

Проведені дослідження впливу шуму від генераторів на ментальне здоров'я людей свідчать про підвищену роздратованість, втомированість, тривожність. Шумовий вплив заважає людям відпочивати, концентрувати увагу для розв'язування питань на робочому місці, що знижує ефективність праці.

Для зниження рівня шуму від генераторів, покращення екологічних умов в місті і стану здоров'я населення пропонується оптимальний вибір типу генератору, технічне вдосконалення пристрою, оптимальне його розміщення у міському просторі, обґрунтування юридичних аспектів застосування генераторів, підвищення шумоізоляції житла.

Методичне значення роботи полягає у тому, що використаний підхід до вивчення шумового впливу генераторів на екологічний стан міського середовища може бути застосований в інших містах. Запропоновані заходи щодо зниження шумового впливу генераторів на довкілля і здоров'я людини можуть бути враховані керівництвом міста, суб'єктами малого бізнесу.

Наукова новизна роботи полягає у тому, що дістало подальшого розвитку вивчення впливу шуму від працюючих генераторів на навколишнє середовище, стан фізичного і ментального здоров'я, визначено основні напрями щодо зменшення його впливу на екологічні умови і стан здоров'я населення.

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

У цьому дослідженні не використовувалася генеративний штучний інтелект.

Список використаної літератури

1. Гринчишин Н.М., Шуцлат Т.І., Жоріна О.О. Шумове забруднення магістральних вулиць центральної частини міста Львова. *Вісник ДУБЖД*. 2021. № 24. С. 6-11. <https://doi.org/10.32447/20784643.24.2021.01>

2. Піскунова Л.Е., Сербенюк Г.А., Голіченко Н.Б. Дослідження рівня акустичного забруднення та його вплив на життєдіяльність людини. *Біологічні системи: теорія та інновації*. 2024. Т15, № 1. С. 73-83. [https://doi.org/10.31548/biologiya15\(1\).2024.006](https://doi.org/10.31548/biologiya15(1).2024.006)
3. Міронова, Н. Г., Морозов, А. В., Морозова, Т. В., Рибак, В. В. Дослідження акустичного навантаження від транспортного потоку на прикладі міста Хмельницького. *Дороги і мости*. 2021. № 24, С. 193–205. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2021.24.193>
4. Степова О.В., Корнішина А.В. Дослідження шумового навантаження центральної частини міста Полтава від автомобільного транспорту. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2021. № 28. С. 100-110. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Uggj_2021_28_11.
5. Полетаєва Л.М., Сафранов Т.А., Житкевич Я.Я. Оцінка шумового забруднення урбанізованих територій від автотранспорту (на прикладі міста Одеса). *Екологічні науки*. 2022. № 2 (41). С. 56-61. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.2-41.10>
6. Максимцев С.І., Дударець С.М. Шумопоглинальні властивості придорожніх лісових смуг різних конструкцій в умовах Західного Полісся. *Ukrainian journal of forest and wood science*. 2020. Т. 11, № 3. С. 25-35. <https://doi.org/10.31548/forest2020.03.003>
7. Бакутін Є.І. Забезпечення права громадян на захист від шкідливого впливу шуму транспортних засобів (сучасна реальність, бачення на перспективу). *Адміністративне право і процес*. 2023. № 2(41), С. 5-17. <https://doi.org/10.17721/2227-796X.2023.2.01>
8. Михайлюк, Ю. Д., Каричорт, І. Б. Оцінювання акустичного навантаження міського середовища через розрахунок рівня шуму. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2026. № 36(1), С. 66–71. <https://doi.org/10.36930/40360107>
9. Корогода, Н.П., Кулчак, Т.Г. Технологія геоінформаційного оцінювання та картографування ефективності міських зелених зон у зниженні рівня автомагістрального шуму. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*. 2023. № 62, С. 205-218. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-16>
10. Бевз О.В., Шараєвська Т.А. Використання генераторів в умовах воєнного стану в Україні та вплив на атмосферне повітря: еколого-правові аспекти. Електронне наукове видання Аналітично-порівняльне правознавство. 2026. № 2, частина 2. С. 28-34. <https://doi.org/10.24144/2788-6018.2026.02.2.3>
11. Гребінь О.П., Швайченко В.Б., Левенець Н.Ф. Основи звукотехніки. Навчальний посібник. Київ КПІ ім. Гіря Сікорського. 2023. 341 с.
12. Про затвердження Державних санітарних норм допустимих рівнів шуму в приміщеннях житлових та громадських будинків і на території житлової забудови. Наказ Міністерства охорони здоров'я України № 463 від 22.02.2019 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0281-19#Text> (дата звернення 10.03.2026 р.)
13. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку ДСН 3.3.6.037-99. Наказ Міністерства охорони здоров'я України № 37 від 01.12.1999 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va037282-99#Text> (дата звернення 10.03.2026 р.)
14. Основні характеристики дизельних генераторів. URL: <https://vinur.com.ua/ua/aboutus/usefull-info/articles/osnovni-harakterystyky-dyzelnyh-generatoriv> (дата звернення 15.03.2026 р)
15. Типи генераторів, переваги та відмінності. URL: <https://procraft.ua/ua/tipi-generatoriv-perevaga-ta-yih-vidminnist> (дата звернення 15.03.2026 р)
16. Борисюк Д.В., Спирін А.В., Присяжнюк Д.В., Твердохліб І.В. Шум як ергономічний фактор виробничого процесу. *Наукові праці ВНТУ*, 2023, № 4. С. 1-9. <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2023-4-8-16>
17. Лепканич А.О., Миронюк І.С. Сон в умовах шумового забруднення студентської молоді (за результатами соціологічного дослідження). *Україна. Здоров'я нації*. 2025. № 1 (79). С. 7-10. <https://doi.org/10.32782/2077-6594/2025.1/01>
18. Жидецький В.Ц., Жидецька Х.В. Вплив умов праці оператора комп'ютерного набору на його продуктивність та якість роботи. *Формування ринкових відносин в Україні*. 2014. № 5 (156). С. 135-139.
19. Оніщук І.П. Вплив шумового навантаження на адаптаційний потенціал здобувачів вищої освіти в умовах навчального середовища. *Український журнал природничих наук*. 2025. № 14. С. 69-80. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.7>
20. Корогода Н.П. Оцінка екосистемних послуг зі зниження рівня шуму від дорожнього руху у міських ландшафтах. *Ландшафтознавство*. 2023. № 1 (3). С. 56–67. <https://doi.org/10.31652/2786-5665-2023-3-56-67>
21. Корогода, Н.П. Оцінка ефективності надання екосистемних послуг зі зниження рівня шуму від дорожнього руху у міських зелених зонах міста (на прикладі міста Києва). *Конструктивна географія та раціональне використання природних ресурсів*. 2024. № 4 (спец.). С. 69-74. <https://doi.org/10.17721/2786-4561.2024.4.special-10/19>

Отримано: 04.04.2026 / Переглянуто: 05.05.2026 / Прийнято: 10.05.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

T. M. ALEKSEEVA, PhD (Geography),
Associate Professor of the Department of Practical Psychology
and Rehabilitation Technologies
email: tatiananikolaivna19@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5671-7372>,
Municipal institution of higher education
“Kremenchuk Humanitarian and Technological Academy” of Poltava Regional Council
V.Fedko Str., 33, Kremenchuk, Poltava region, 39600, Ukraine

GENERATOR NOISE AS A FACTOR INFLUENCING THE ENVIRONMENT AND HUMAN HEALTH (ON THE EXAMPLE OF KREMENCHUK)

Purpose. To investigate the impact of operating generators on the ecological conditions of the urban environment and public health, using the central part of Kremenchuk as a case study, with a view to reducing this impact.

Methods: analysis, synthesis, comparison, questioning method, statistical method, cartographic method.

Results. Low-power generators are mainly installed in the central part of Kremenchuk: petrol generators, which are not equipped with protective enclosures, diesel models of the same power rating without protective enclosures, low-power petrol generators without enclosures, inverter models, petrol generators of different power rating, equipped with protective enclosures. There are zones with a high concentration of generators in the centre of Kremenchuk, where the noise level does not comply with health standards; this is unacceptable as the area features by residential developments and numerous educational, medical and recreational facilities. Generators are installed at the distance of 1 to 2-3 metres from a pedestrian zone and this has a negative impact on the local population. The distance between them is negligible, so their areas of influence overlap. A study of the impact of generator noise on the quality of human sleep showed that it constantly or often interferes with a full night's rest. A study of the impact of generator noise on the ability to concentrate showed that there were constant problems with concentration at work. Generator noise causes a person to be irritable and creates a feeling of discomfort.

Conclusions. Inverter generators and other models equipped with protective enclosures for reducing the negative noise impact on the town environment and the population health are recommended for installation. Optimal places for their location shall be selected, sound isolation shall be improved, and a legal reasoning for a generator exploitation for the town residents' interest's protection shall be established.

KEY WORDS: generator, noise pollution, hygiene conditions, mental health

Conflict of Interest

The author declares that there is no conflict of interest regarding the publication of this manuscript. The author fully adhered to ethical standards, including issues of plagiarism, data fabrication, and duplicate publication.

AI Statement

This study did not use generative artificial intelligence.

References

1. Grynchysyn N.M., Shuplat T.I., Zhorina O.O. (2021). Noise pollution of the main streets of the central part of the city of Lviv. *Bulletin of Lviv State University of Life Safety*, 24, 6-11. <https://doi.org/10.32447/20784643.24.2021.01> (in Ukrainian)
2. Piskunova L.E., Serbeniuk H.A., Holichenko N.B. (2024). Study of the level of acoustic pollution and its impact on human life. *Biological Systems: Theory and Innovation*, 15(1), 73-83. [https://doi.org/10.31548/biologiya15\(1\).2024.006](https://doi.org/10.31548/biologiya15(1).2024.006) (in Ukrainian)
3. Mironova N.G., Morozov A.V., Morozova T.V., Rybak V.V. (2021). Study of acoustic load from traffic flow on the example of the city of Khmelnytsky. *Dorogi I mocti*, 24, 193-205. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2021.24.193> (in Ukrainian)
4. Stepova O.V., Kornishyna A.V. (2021). Research on noise pollution of the central part of the Poltava city from road transport. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 28, 100-110. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/Uggi_2021_28_11 (in Ukrainian)
5. Polietaieva L.M., Safranov T.A., Zhytkevych Ya.Ya. (2022). Assessment of noise pollution of urbanized territories from motor vehicles (on the example of the city of Odesa). *Scientific and practical journal. Environmental Sciences*, 2 (41), 56-61. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.2-41.10> (in Ukrainian)
6. Maksimtsev S.I., Dudarets, S.M. (2020). Noise-absorbing properties of road-wood forest strips of different structures in the conditions of Western Polisia. *Ukrainian journal of forest and wood science*, vol. 11, 3, 25-35. <https://doi.org/10.31548/forest2020.03.003> (in Ukrainian)

7. Bakutin Ye. I. (2023). Ensuring the right of citizens to protection from the harmful effect of vehicle noise (modern reality, vision for future). *Administrative law and process*, 2 (41), 5-17. <https://doi.org/10.17721/2227-796X.2023.2.01> (in Ukrainian)
8. Mykhailiuk Yu.D., Karychort I.B. (2026). Assessment of acoustic load in the urban environment through noise level calculation. *Scientific Bulletin of UNFU*, 36(1), 66–71. <https://doi.org/10.36930/40360107> (in Ukrainian)
9. Korohoda N.P., Kupach T.G. (2023). Technology for geoinformation assessment and mapping of the effectiveness of urban green spaces in motorway noise reducing. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, 62, 205-218. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-16> (in Ukrainian)
10. Bezv O.V., Sharaievskva T.A. (2026) The use of generators under martial law in Ukraine and their impact on atmospheric air: environmental and legal aspects. *Analytical and comparative jurisprudence*, 2, 28-34. <https://doi.org/10.24144/2788-6018.2026.02.2.3> (in Ukrainian)
11. Hrebin O.P., Shvaichenko V.B. & Levenets N.F. (2023). *Basics of sound engineering. Study guide*. National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». (in Ukrainian)
12. On the Approval of State Sanitary Standards for Permissible Noise Levels in Residential and Public Buildings and in Residential Areas. Order of the Ministry of Health of Ukraine. № 463 from April, 22 2019. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0281-19#Text> (in Ukrainian)
13. Industrial noise, ultrasound, and infrasound sanitary Standard SSS 3.3.6.037-99. The Order of the Ministry of Health of Ukraine No. 37 of December, 1 1999. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va037282-99#Text> (in Ukrainian)
14. Main characteristics of diesel generators. Retrieved from <https://vinur.com.ua/ua/aboutus/usefull-info/articles/osnovni-harakterystyky-dyzelnyh-generatoriv> (in Ukrainian)
15. Types of generators, advantages and differences. Retrieved from <https://procraft.ua/ua/tipi-generatoriv-perevaga-ta-yih-vidmynnist> (in Ukrainian)
16. Borysiuk D.V., Spirin A.V., Prysiazhniuk D.V., Tverdohlib I.V. (2023). Noise as an ergonomic factor in the production process. *Scientific Works of Winnytsia National Technical University*, 4. 1-9. <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2023-4-8-16> (in Ukrainian)
17. Lepkanych A.O., Myroniuk I.S. (2025). Sleep in the conditions of noise pollution of student youth (based on the results of a sociological study). *Ukraine. Nation's health*, 1 (79), 7-10. <https://doi.org/10.32782/2077-6594/2025.1/01> (in Ukrainian)
18. Zhydetskyi V. Ts. Zhydetska H. V. (2014). The impact of working conditions on a computer operator's productivity and work quality. *Market relations development in Ukraine*, 5 (156), 135-139. (in Ukrainian)
19. Onyshchuk I.P. (2025). Impact of noise exposure on the adaptive potential of higher education students in the educational environment. *Ukrainian Journal of Natural Sciences*, 14, 70-80. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.7> (in Ukrainian)
20. Korohoda N.P. (2023). Assessment of ecosystem traffic noise reduction service in the urban landscapes. *Landscape Science*, 1 (3), 56-67. <https://doi.org/10.31652/2786-5665-2023-3-56-67> (in Ukrainian)
21. Korohoda N.P. (2024). Assessment of the effectiveness of ecosystem traffic noise reduce services in urban green spaces (on the example of Kyiv). *Constructive geography and rational use of natural resources*, 4, 69-74. <https://doi.org/10.17721/2786-4561.2024.4.special-10/19> (in Ukrainian)

Submission received: 04.04.2026 / Revised: 05.05.2026 / Accepted: 10.05.2026 / Published: 30.05.2026

<https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-11>

UDC: 664:613.22:504

N. I. CHEREVYCHNA¹, PhD (Technics)

Associate Professor at the Department of Hotel, Restaurant Business and Kraft Technologies
e-mail: nataliia.cherevychna@hneu.net ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6660-5366>

Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics
9-A Nauky Ave, Kharkiv, 61165, Ukraine

D. P. KRAMARENKO¹, PhD (Technical)

Associate Professor at the Department of Hotel, Restaurant Business and Kraft Technologies
e-mail: kramarenkodp@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1353-686X>

Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics
9-A Nauky Ave, Kharkiv, 61165, Ukraine

N. I. HIRENKO, PhD (Technical)

Associate Professor at the Department of Professional Education, Restaurant
and Tourism Business

e-mail: n.i.hirenko@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6854-8257>

Luhansk Taras Shevchenko National University
2, Viktora Novikova Str., Lubny, 37500, Ukraine

ENVIRONMENTAL ASPECTS OF BABY FOOD PRODUCTION

Purpose. To study the current state of the baby food market in Ukraine in terms of environmental aspects of production, quality and safety management of raw materials and finished products, environmental labelling and harmonisation of national legislation in the field of baby food with European standards.

Methods. System-structural, abstract-logical, statistical method, methods of induction, deduction, comparison, as well as system-analytical method.

Results. The article presents the national (commodity and medical) and European classification of baby food. It is determined that 64 % of the Ukrainian market is made up of imported products (mainly Nestlé, Danone, HiPP brands), which have advantages due to the use of specialised European raw material zones. The article describes domestic baby food producers that compete with imported analogues. It is noted that some of them are introducing environmental innovations in production and packaging. The author highlights the impact of the latest legislative changes of 2025-2026 on environmental labelling, safety control and environmental friendliness of baby food products. This indicates a significant shift in the vector of greening at the legislative level towards the harmonisation of Ukrainian legislation with European legislation. The article also examines the problem of greenwashing in Ukraine and the effectiveness of the national legislative framework in combating the misuse of pseudo-environmental labelling.

Conclusions. The article confirms that the introduction of an environmental labelling system is a key preventive mechanism for ensuring the safety of baby food. Global and Ukrainian sociological studies show a high demand for organic baby food. However, the spread of greenwashing reduces the trust of Ukrainian consumers in local brands in favour of European ones. Overcoming this problem and focusing on the concept of Zero Waste and sustainable development are critical to increasing the competitiveness of domestic producers.

KEY WORDS: *baby food, environmental safety, environmental labelling, specialised raw material zones, greenwashing, organic products, European integration*

Як цитувати: Cherevychna N. I., Kramarenko D. P., Hirenko N. I. Environmental aspects of baby food production. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2026. Вип. 45. С.137–148. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-11>

In cites: Cherevychna, N. I., Kramarenko, D. P. & Hirenko, N. I. (2026). Environmental aspects of baby food production. *Man and Environment. Issues of Neoeology*, (45), 137–148. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-11>

Introduction

Baby food products are a group of products for feeding children in the first three years of life, preschoolers and schoolchildren, as well as specialised products for therapeutic nutrition of sick young children. They are designed to meet the nutrient needs of the child's body at different stages of its development. Since food is a plastic material for building the basic tissues of a growing organism, as well as a source of energy to make up for the energy expenditure in the course of life, the role of baby food products for the child's body is extremely important.

The production and sale of baby food products requires special attention from both producers and market operators and consumers of this product group. Providing children with safe and high-quality food is a national priority for any country.

Today, there is no unequivocal opinion on ecological bioproducts. A number of experts believe that it is necessary to distinguish between the concepts of environmentally friendly production, where the product is manufactured, and an environmentally friendly product that meets the standards of human nutrition. For example, if a company uses motor vehicles with internal combustion engines for its production, it cannot be classified as environmentally friendly.

Organic products are most relevant in children's nutrition due to the physiological characteristics of a child's body, which is more sensitive to the presence of harmful chemicals in food than an adult's body. Therefore, in some

countries, organic products account for half of the baby food market.

The fundamental aspects of quality management and environmental safety of food products at the stage of raw material selection are covered in the works of Y. Slyva, N. Bukalova, T. Prylipko, and V. Nosik. O. Rechun, O. Peredrii, V. Ploskonos, V. Halys, and O. Rechun have studied the issue of technologies for the production of environmentally friendly packaging materials and the assessment of environmental risks associated with the migration of toxic substances from packaging materials into baby food products. Researchers E. Mykhailova and M. Vorozhbiyan analyse the Ukrainian and European experience of introducing environmental labelling as an effective mechanism for ensuring the safety of baby food. The issue of environmental labelling and eco-certification of baby food is reflected in the scientific works of S.V. Berzina and N.M. Bogatko [1-8].

Despite the process of implementation of European legislation in the field of legal and regulatory measures, the system of state control over food safety in Ukraine, namely in the baby food sector, is still undergoing improvement. Therefore, the purpose of this study is to investigate the current state of the baby food market in Ukraine in terms of environmental aspects of production, quality and safety management of raw materials and finished products, environmental labelling and harmonisation of domestic baby food *legislation* with European standards.

Objects and Methods of Research

The object of the study is baby food with an emphasis on the integrated system of ensuring its quality, environmental safety and compliance with regulatory standards. The methodological basis of the article is based on the use of a set of analytical, statistical, logical and system-structural methods. The study uses a systematic approach, according to which all market processes and phenomena in the field of baby food production were analysed in their integrity and interdependence.

The following scientific methods were used to obtain the main theoretical results: abstract and logical, methods of analogy,

comparison, induction and deduction. In analysing the current state of the domestic baby food market, the statistical method was used; the method of comparison (critical understanding of methodological approaches, concepts, models and proposals of leading scientists dedicated to increasing environmental awareness and enhancing safety in the field of baby food production); systematic and analytical method (study of legislative acts and other regulatory documents). All of these research methods complement each other and together provide an opportunity to comprehensively consider the subject of the study.

Results and Discussion

Baby food products are divided into subgroups depending on the type of main raw material:

- grain-based
- milk-based;

- fruit and berry and vegetable based;
- fish and meat-based.

Along with the above commodity classification, a medical classification is used, which identifies four groups of products that children need for the entire period of growth and development, taking into account their daily needs and the child's age (in ml):

Group 1 – Protein-containing foods (meat, fish, eggs, cottage cheese, curd, peas, beans, soya, lentils), the daily requirement for which is $100+15n$, where n is the number of years of the child.

Group 2 – Milk and dairy products. Their daily requirement is 500-600 g regardless of age;

Group 3 – Fats, which should include animal oil ($15+n$), vegetable oil ($5+n$), natural unvitaminised cod fish oil ($5+n$);

Group 4 – Fruits and vegetables (except potatoes), including juices, the daily requirement for which is $300+30n$ [9].

The European classification of baby foods has a legal and regulatory framework based on Regulation (EU) № 609/2013 and related directives.

Unlike the traditional commodity classification by type of raw material, European legislation divides products into four main categories depending on their purpose and the physiological needs of the child.

1. *Infant formula and follow-on formula*, which fully or partially replace breast milk. They are divided according to the age of the child into:

- Infant formula, intended for babies from birth to 6 months (labelled with the number 1 or the word Pre on the packaging);

- Follow-on formulas intended for children aged 6 months and older as a liquid component of complementary foods (labelled with the numbers 2 (from 6 months), 3 (from 10–12 months) and 4 (from 18 months and older).

2. *Processed cereal-based foods* for feeding infants and young children during weaning or transition from formula to regular food. It includes: simple cereal porridges (to be diluted with milk or other liquid); cereal milk porridges (to be diluted with water only); baby pasta; crackers and baby biscuits.

3. *Baby foods, which are not mixtures or cereal products*. They are divided by consistency and composition depending on the age of the child:

- one- or two-component homogenised fruit, vegetable or meat purees (from 4–6 months);

- purees with a soft texture containing small pieces to stimulate chewing skills (from 8 months);

- multi-component ready-to-eat meals (stews, pasta with meat, etc.) adapted to the needs of children from one year old and containing larger pieces (from 12 months);

- fruit bars, special children's yoghurts, fruit and milk desserts.

4. *Foods for Special Medical Purposes* are developed exclusively for children with diagnosed diseases, disorders or specific medical conditions whose needs cannot be met by regular food (hypoallergenic and anti-reflux formulas, food for premature and underweight children, lactose-free formulas or specialised amino acid formulas)

European baby food manufacturers also use a unified age navigation (Stages) on labels, which corresponds to the consistency of the product and the ability of the child's gastrointestinal tract to absorb certain ingredients (4+ months, 6+ months, 8+ months, 10+ months, 12+ months) [10].

According to official statistics, the production of domestic baby food products is estimated at about 6.3 thousand tonnes per year. The largest share in the total production of these products is milk-based baby food (59 %), as well as fruit and vegetable purees and juices (about 26 %). Smaller volumes are represented by flour-based baby food (about 8%) and various homogenised fruit and berry products (about 7 %) [11].

In Ukraine, the demand for domestic baby food products is more than half met by imported products. The largest importers of baby food on the Ukrainian market are European countries, accounting for 64 % of total imports.

Today, Ukraine has a stable range of suppliers of imported baby food (Table 1). The key positions are held by multinational corporations such as Nestlé (Switzerland) – NAN, NESTOGEN, Gerber brands; Danone/Nutricia (Netherlands) – Aptamil, Milupa brands; HiPP (Austria). The German company Humana and the Czech company Hamé, as well as Slovenian brands Bebi and Frutek, are also active in the market. Much of the products of these brands are manufactured at powerful European factories in Eastern Europe, in particular in Hungary, Poland and the Czech Republic, which ensures stable logistics to the Ukrainian market [11, 12].

It is noteworthy that in 2026, great emphasis is placed on specialised (therapeutic) nutrition for children, where Nutricia and Nestlé are almost monopolists.

Table 1

Results of the analysis of the main suppliers of baby food

Company / brand (country)	Status in the Ukrainian market	Characteristics of the company
Nestlé (Switzerland)	Leader	NAN, NESTOGEN, Gerber brands. Nestlé is actively investing in production in Ukraine, although most baby food remains imported.
Danone (Netherlands)	Leader	Brands Aptamil, Milupa. Nutricia are part of the Danone group. They have a large share in the formula and cereal segment.
HiPP (Austria)	Stable	One of the most popular brands of organic baby food. It is supplied mainly from factories in Germany, Austria and Hungary.
Humana (Germany)	Active	Stable presence in pharmacy chains and speciality stores.
Heinz (Germany)	Limited presence	After the sale of a number of plants in Eastern Europe, the brand's share in Ukraine slightly decreased compared to 2010-2019.
Hame (Czech Republic)	Niche	Remains a representative in the pureed meat segment.
Frutek (Slovenia)		A brand of Fructal that is present on the market but has less marketing activity compared to the leaders.
Bebi (Serbia, Slovenia)		The Bebi brand (formerly Droga Kolinska) is now owned by the Serbian Nelt Group or Atlantic Grupa (depending on the region of distribution). Production is often localised in other EU countries.

The main advantages of imported baby food include:

- a wider range of products: from adaptive breastmilk substitutes to complementary foods and clinical nutrition;
- a wide range of foods for children with special needs (hypoallergenic and lactose-free formulas, products for premature babies, etc.);
- maximum closeness of the majority of imported formulas to breast milk in terms of composition and, therefore, better acceptance by infants;
- use of modern ergonomic packaging materials for long-term storage without loss of quality and nutrients;
- the use of environmentally friendly raw material areas and a strong scientific base that ensures a high level of product quality and safety [13].

It is well known that high-quality raw materials are the key to product safety for children. To obtain high-quality raw materials, it is necessary to allocate environmentally friendly land where no synthetic fertilizers, pesticides, herbicides and other harmful substances are used in the cultivation of agricultural products, biodiversity is maintained and the principles of sustainable agricultural production are followed.

The allocation of special fields for growing raw materials for baby food is a standard practice for the world's leading brands. Officially, such areas are often called «special raw material zones» or «organic/ecological farms». Such zones exist in many countries with developed agricultural sectors and strict quality control standards (Table 2).

Table 2

Main countries with specialised raw material zones for baby food

Country/companies (brands)	Specialisation and types of raw materials	Characteristics and features of safety control
Germany, Austria, Switzerland Brands: HiPP, Holle.	A wide range of agricultural raw materials	Organic farming (Bio/Organic standards). Strict control: even the chemical composition of rainwater is checked.
Italy, Spain	Fruit (apples, peaches, plums), tomatoes, cereals	Specialised plantations for European puree and cereal factories.
Poland, Hungary, Czech Republic Nestlé, Danone/Nutricia.	A wide range of agricultural raw materials	Farming in accordance with EU standards. Powerful bases with huge certified areas.
New Zealand, Ireland, the Netherlands Brands: Aptamil, NAN, Nutrilon.	Raw materials.	Ecological pastures. "Reference milk" for the production of dry mixes.

The main factors in the quality and safety of such raw material zones are long-term (3 to 5 years) soil preparation before obtaining a Bio/Organic certificate, including cleaning from pesticide and agrochemical residues, as well as the use of natural fertilizers and biosecurity. These fields must be isolated from industrial facilities, motorways and landfills. Baby food producers enter into direct long-term contracts with farmers, fully controlling the process from sowing to harvesting.

Prior to the cancellation in July 2022 of the Cabinet of Ministers' Resolution «On Approval of the Procedure for Granting the Status of a Special Zone for the Production of Raw Materials Used for the Manufacture of Baby and Dietary Food Products», more than 80 farms in 14 regions of Ukraine (Vinnytsia, Volyn, Dnipropetrovsk, Zhytomyr, Ivano-Frankivsk, Kyiv, Odesa, Poltava, Sumy, Kharkiv, Kherson, Khmelnytsky, Cherkasy, Chernihiv) had the status of a special raw material zone. In these areas, animal and vegetable products were grown for baby food production.

Against the backdrop of a fairly high share of imports, the position of Ukrainian baby food producers has strengthened tremendously. They are now competing with their foreign partners on the basis of price and availability. An analysis of the baby food market shows that 11 companies are currently leading the domestic production of these products.

Khorol Milk and Baby Food Cannery LLC (Khorol, Poltava region) remains the only enterprise in Ukraine specialising in the production of milk powder for infants in the first days of life (TM Malyuk, Malyutka) and baby water TM Malyuk, which is recommended for children from the first days of life for constant consumption. Since milk dust is generated during the spray drying of milk, the facility is equipped with modern cyclones and filters that capture fine product particles, preventing their emission into the environment. Additionally, due to the use of large volumes of industrial water, the plant utilizes CIP (Clean-in-Place) systems that facilitate wastewater pre-treatment. The enterprise is certified under the ISO 14001:2015 environmental management system.

Odesa Baby Food Canning Plant JSC (Odesa) is a long-standing leader in the canned fruit and vegetable segment, specialising in the production of fruit and vegetable purees, juices and nectars for children (TM Chudo-Chado,

Malyatko). The plant's environmental impact centers on water and energy consumption for sterilization (local filtration units for wastewater pre-treatment; modern pasteurizers and sterilizers help reduce gas and electricity usage), and maintaining the Zero Waste concept (fruit and vegetable pomace from juice production is diverted to animal feed or fertilizer production; separately collected paper, polyethylene, and glass cullet are sent for recycling).

FDI Econia LLC (Zolotonosha, Cherkasy region) is one of the first companies in Ukraine to produce children's water with a focus on environmental friendliness (TM Malyatko, Akvulya, Chytyi Klyuch, YODO, DIVO VODA). Today it has representative offices in Slovakia and Cyprus. As of 2025, the company produces a full cycle of baby food (biscuits, porridge, mashed potatoes, juices under the Malyatko brand). This facility was designed and built from the ground up, ensuring full compliance with modern environmental standards. The Cherkasy region is traditionally considered an agricultural area with a low industrial footprint, eco-location. For packaging, the enterprise uses only BPA-free food-grade plastic and implements lightweighting technologies for plastic bottles.

Yagotynsky Butter Plant, Yagotynske for Children branch (Zgurivka, Kyiv region) produces a full range of dairy products for children aged 6 months and over under the Yagotynske for Children brand. 40 % of the Ukrainian baby milk market belongs to this manufacturer. The enterprise serves as a benchmark for Ukraine in terms of environmental safety (CIP systems for wastewater treatment, sorting and transferring packaging waste for recycling, and the implementation of the ISO 14001:2015 environmental management system).

Lustdorf LLC (Illintsi, Vinnytsia region) is a major producer of baby milk and milkshakes (Selyanske, Buriienka, Na Zdorovyie). Lustdorf is actively implementing environmental changes, namely the eco-friendly Tetra Gemina packaging with the innovative HeliCap™ 26 Pro non-removable lid. The new format of the lid can significantly reduce environmental pollution and reduce CO₂ emissions to 1.4 million tonnes of equivalent by 2030.

PrJSC Prydniprovsky Plant (Dnipro) is a long-standing leader in the production of baby dairy products (Zlagoda Malyatko TM). The Zlagoda plant was one of the first in Ukraine to widely use eco-friendly packaging. An

innovative example is the Lean Pack flexible packaging, which contains natural minerals (particularly chalk) that accelerate its degradation. Since the plant is a large industrial facility in a densely populated area, it is constantly under the supervision of municipal environmental authorities.

Firm Favor LLC (Kyiv) produces 7 types of dairy and fermented milk products for baby food (TM AMA, A-MAM). In 2020, the company successfully confirmed its naturalness and received the right to use the word «Natural» and the «Natural Product» labelling mark (certificate № UA.08.002.513). «Favor» makes a significant environmental contribution by developing energy-efficient and clean production, has an environmental certificate in accordance with ISO 14024 and a food safety management system certificate, confirming the low environmental impact of its products. In 2023 and 2025, the company confirmed the compliance of its products with environmental criteria, receiving awards from the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine and the independent certification body Living Planet.

Municipal Enterprise «City Dairy Factory-Baby Food Kitchen» (Kharkiv) is the only enterprise in the city that produces liquid and paste-like dairy products for children from 6 months of age. Despite the city's frontline status, it continues to provide the region with fresh therapeutic and preventive nutrition. The enterprise is implementing a strategy for transitioning to a circular economy. The central kitchen is the only one in Ukraine that has preserved a returnable glass container system for baby food.

Wise Food Processing Company LLC (Dnipro) produces dairy-free baby food based on cereals for children from 6 months and more than 20 types of instant cereals. The company is part of the organic food segment. The primary production method is extrusion, which, from an environmental standpoint, is one of the «cleanest» methods of processing raw materials. The installed high-capacity exhaust systems and cyclone filters prevent dust dispersion into the ambient air of the city's industrial zone.

HIPP-Uzhhorod LLC (Zakarpattia region) is an important logistics and production centre for HiPP, which specialises in organic raw materials, herbal teas and juices. The company is a distributor in Ukraine of organic baby food TM Hipp and Bebevita, as well as baby cosmetics TM Babysanft. As part of the HiPP Group, Hipp-

Uzhhorod LLC makes a significant environmental contribution based on the principles of sustainable development, namely, actively reducing CO₂ emissions; using energy-efficient technologies; environmentally friendly office and advertising materials, paper and writing utensils; introducing eco-friendly packaging; implementing measures to protect climate and water resources, supporting biodiversity and environmental conservation projects.

Modern baby food production is accompanied by a significant environmental footprint - from greenhouse gas emissions at the farming stage to microplastics left over from packaging. Pollution of soil, water and air with heavy metals, pesticide residues, nitrates and mycotoxins affects the environmental safety of the raw materials.

Many infant formulas are based on cow's milk. According to international studies, the production of 1 kg of milk powder produces about 4 kg of CO₂ equivalent. In addition, the supply chain (from growing animal feed to producing milk) requires thousands of litres of fresh water [14].

Baby food production plants produce wastewater that is highly toxic to water bodies, containing high concentrations of total nitrogen, lactose (up to 0.25 %) and milk fats, which leads to a critical reduction in oxygen in water (chemical oxygen demand can reach 1700 mg O₂/dm³), which, if not properly treated, causes blooms and fish kills.

Sophisticated packaging used for preservative-free baby food, such as soft pouches (sachets with lids) and multilayer plastic packaging, is virtually impossible to recycle. Therefore, billions of such bags end up in landfills every year, where they decompose into microplastics.

In 2020, the European Union adopted a comprehensive Farm to Fork plan to create a sustainable ecological food system and new regulations on packaging waste. The plan is to make all packaging recyclable or reusable by 2030. European manufacturers are investing in the development of mono-materials for baby food (spiders made of one type of plastic that can be recycled) [10].

For example, Danone and Nestlé are implementing the principles of regenerative agriculture to reduce methane emissions at dairy farms. To solve the problem of packaging, some European manufacturers cooperate with innovative recyclers (such as TerraCycle), which create

special collection points exclusively for children's pouches, recycling them into outdoor furniture or building materials [15].

In the current environment, Ukraine is witnessing a deterioration in the overall environmental situation. Large areas of contaminated and mined land as a result of military operations, as well as the intensified use of agrochemicals, pose risks of contamination of raw materials. Therefore, environmental aspects of domestic baby food production are a key factor in the safety of the finished product.

The Law of Ukraine «On Waste Management» in the new version of 02.03.2026 launches a mechanism of extended responsibility of baby food producers, namely the introduction of mandatory funding for the collection and recycling of their packaging. Domestic juice and puree factories must modernise their own treatment facilities (aerotanks and biofilters) to prevent organic waste from being discharged into the municipal sewerage system [16].

In 2025–2026, Ukraine and the EU countries underwent extremely important legal and regulatory changes that directly affect the safety of packaging, environmental labelling and control of the safety and environmental friendliness of baby food products. This indicates a significant shift in the vector of environmentalisation at the legislative level towards the harmonization of Ukrainian legislation with the European one.

In particular, the implementation of Regulation (EU) 2025/351 has set new, much stricter criteria for the environmental safety of plastic materials (microplastics and chemicals from containers) that come into contact with infant food (purees and formulas) in order to minimise the migration of unintentionally added substances (NIAS). In addition, the updated guidelines of the State Service of Ukraine on Food Safety and Consumer Protection pay special attention to the transparency of labelling and environmental labelling of baby food, which is an integral part of ensuring its safety in the face of today's environmental challenges [17, 18].

The Verkhovna Rada of Ukraine adopted as a basis the draft Law «On Amendments to Certain Legislative Acts of Ukraine on Bringing Ukrainian Legislation in the Field of Baby Food in Line with the Requirements of EU Legislation» № 4554 (adopted on October 21, 2021; entered into force on May 13, 2022), which aims to bring Ukrainian legislation in the field of production and circulation of baby food in line with the

requirements of EU legislation. Specifically, in 2022, the Law of Ukraine «On Baby Food» has become null and void; significant changes regarding the regulation of quality, safety, and labeling specifics in the field of baby food have been made to the Laws of Ukraine «Fundamentals of Ukrainian Legislation on Health Care» (dated November 19, 1992, No. 2801-XII), «On Basic Principles and Requirements for Food Safety and Quality» (amended in 2014), «On State Control over Compliance with Legislation on Food, Feed, Animal By-products, Animal Health and Welfare» (dated May 18, 2017, No. 2042-VIII), «On Consumer Information Regarding Food Products» (dated December 6, 2018, No. 2639-VIII) and «On Advertising» (dated July 3, 1996, No. 270/96-VR).

Environmental labelling is a statement that indicates the environmental aspects of the production or content of a particular product. It can be presented in the form of phrases, symbols or images on labels or packaging, in technical documentation, advertising materials, etc. The purpose of environmental labelling is to confirm verified information about the environmental characteristics or benefits of a product. The general principles and methods of its application are set out in the international standards of the ISO 14020 series «Environmental labels and declarations», which have been implemented into the Ukrainian national standardisation system by means of an identical translation and are directly applicable (DSTU ISO 14020 series) [19].

As for the labelling of baby food with eco-labels, this most often refers to certificates of organic production, which guarantee that the raw materials are grown without pesticides, chemical fertilisers and GMOs, and that there are no artificial colours or preservatives. The following labels can be found on baby food products available on the domestic market:

– *Euro-leaf* is the official EU organic label that guarantees that products meet strict EU organic farming and animal husbandry standards (HiPP, Gerber Organic);

– *Bio-Siegel* (Germany) is a national German mark that often accompanies the Euro-leaf on the label (HiPP, Bebivita);

– *The State Mark of Organic Products* (consisting of two circles forming a yellow-blue leaf) – confirms the product's compliance with the Law of Ukraine «On Basic Principles and Requirements for Organic Production, Circulation and Labelling of Organic Products» (products of LLC FDI «Econia») [20, 21].

Domestic producers often use the so-called *greenwashing*, a marketing ploy that makes consumers believe that a product is environmentally friendly or organic, when in fact it is not. Most often, fake eco-labels are used on baby food, such as «Eco product», «Ecologically clean product», «ECO», etc. Some baby food producers stylise the labels as large green eco-signs and place them in the most visible place [22, 23].

In Ukraine, the Law of Ukraine «On Basic Principles and Requirements for Organic Production, Circulation and Labelling of Organic Products» (№ 2496–VIII) prohibits the use of such terms without a certificate.

According to Article 34 of this Law, if a product has not undergone an official organic certification procedure, it is prohibited to use the following words or words with the same root in its labelling or advertising «organic», «biodynamic», «biological», «ecological», «organic», as well as any derivatives thereof, including the popular prefixes bio- and eco-.

In addition, there are laws in Ukraine that also protect consumers from environmental misinformation. The Law of Ukraine «On Information for Consumers on Food Products» prohibits the use of information that may mislead consumers about the characteristics or properties of a product. Under the Law of Ukraine «On Protection against Unfair Competition», the Antimonopoly Committee may fine a company if it attributes fictitious environmental performance to its product to gain an advantage over competitors.

Conclusions

As the baby food market is particularly sensitive to environmental initiatives, many countries in Europe and the US conduct global surveys and analyses to monitor the safety and environmental friendliness of products for children. They are conducted by companies such as Nielsen, Mordor Intelligence, Grand View Research, as well as universities and research centers.

According to these studies, the most active consumers of organic products in Europe and the US are women aged 25–40 with children who care about the future of their families. They buy organic food, eco-friendly household chemicals, etc. for their children. This segment of consumers is receptive to information about the need to take care of their health and preserve the planet for future generations. Economic studies show that parents are willing to pay an average of 17–27 % more for certified organic baby food compared to conventional baby food [22].

In general, the terms «ecological», «organic», «bioproduct» and similar are often used synonymously, although there are certain peculiarities between them, depending on the legislation of a particular country. The choice of word also depends on the language of the country. Organic is more commonly used in English-speaking countries (UK, USA). Bio is a popular term in Germany, France and Italy. The term Eco is often used in Scandinavian countries.

In the European Union, according to Regulation (EU) 2018/848, the terms Organic, Bio and Eco are legally equivalent. In a broader international context (ISO 14024), «sustainability» can refer not only to the composition of food, but also to the environmental impact throughout the product's life cycle [23].

Thus, the introduction of an eco-labelling system (in particular, in accordance with the international standard ISO 14024) is one of the most effective preventive mechanisms for ensuring the safety of baby food products. Ecolabelling is an indicator that products have undergone an independent assessment of compliance with strict environmental criteria at all stages of their life cycle – from growing raw materials in environmentally favourable areas to using safe packaging. For the Ukrainian market, eco-labelling is not only a tool to increase the competitiveness of domestic producers in the domestic and European markets, but also a critical benchmark for consumers in choosing guaranteed safe products.

In Ukraine, research on the consumption of organic baby food is conducted on a smaller scale. These surveys are usually initiated by certification bodies (Organic Standard), the Organic Initiative Association, the Living Planet NGO, the Pro-Consulting research agency, international donor projects supporting the organic sector, etc.

The results of sociological surveys show that Ukrainian families most often become interested in organic products when a child is born. However, consumers often get lost in greenwashing, which is why the level of trust in well-known European organic brands among Ukrainian parents is often higher than in domestic producers.

Today, leading a «green» lifestyle, being «ekofriendly», is becoming a global trend. Adherents of this philosophy consume environmentally friendly products, use energy-saving technologies and alternative energy sources, limit the

use of materials that have a negative impact on the environment, and support the Zero Waste

concept, which aims to avoid polluting the planet and change people's lifestyles and mindsets.

Conflict of Interest

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

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

AI Statement

In this study, generative artificial intelligence was not used.

References

1. Slyva, Yu. (2021). Scientific basis of the concept of food safety management in accordance with the requirements of international standards. *Commodity Bulletin*, (14). <https://doi.org/10.36910/6775-2310-5283-2021-14-10> (in Ukrainian)
2. Bukalova, N., & Bohatko, N., Prylipko, T. (2023). Problems of environmental food safety in Ukraine. In *Proceedings of the scientific and practical online conference «Food safety and quality in the concept of «One Health»* (pp. 10–11). Lviv, Ukraine. <https://doi.org/10.32718/konf.1-2.06.2023> (in Ukrainian)
3. Nosik, V. V. (2024). Legal problems of production of agricultural raw materials for baby food. *Analytical and Comparative Jurisprudence*. (1). <https://journal-app.uzhnu.edu.ua/article/view/299967?utm> (in Ukrainian)
4. Rechun, O., & Tkachuk, V. (2022). The use of biodegradable polymers and antimicrobial packaging materials in food packaging. *Commodity Bulletin*, (15). <https://doi.org/10.36910/6775-2310-5283-2022-15-24> (in Ukrainian)
5. Rechun, O.Y., & Peredrii, O.I. (2021). Active and smart food packaging. *Commodity Bulletin*, (14). 65-77. <https://doi.org/10.36910/6775-2310-52832021-14-7> (in Ukrainian)
6. *Technology for the production of environmentally friendly packaging materials based on paper and cardboard* (2023). <https://ela.kpi.ua/bitstreams/5ae1a15c-7ffc-45e1-a0b6-408b9ba9ab91/download> (in Ukrainian)
7. Mikhailova, E. O., Vorozhbiyan, M. I., & Moroz, M. O. (2018). Principles of implementation of environmental labelling of products. *Municipal economy of cities. Series: Technical sciences and architecture*, (144). 43-50. http://nbuv.gov.ua/UJRN/kgm_tech_2018_144_8 (in Ukrainian)
8. Berzina, S. V. (2024). *Ecocertification of food products for the domestic and EU markets*. https://living-planet.org.ua/images/2024/29_09_2024_ecosertification_berzina.pdf (in Ukrainian)
9. Tkachenko, N. (2016). Features of baby food classifications in Ukraine and the world. *Food Science and Technology*, 10(1). <https://doi.org/10.21691/fst.v10i1.73> (in Ukrainian)
10. European Parliament and Council. (2013). *Regulation (EU) No 609/2013 on foods intended for infants and young children, foods for special medical purposes and whole food substitutes for weight control*. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2013:181:0035:0056:en:PDF>
11. Kolbina, N. G. (2022). Ways to improve the administrative and legal regulation of the production and circulation of baby food. *Kyiv Journal of Law*, (1), 117-122. <https://doi.org/10.32782/klj/2022.1.18> (in Ukrainian)
12. Tyagunova, N. M. (2025) Assortment policy and peculiarities of organisation of trade in organic baby food in Ukraine. *Scientific Bulletin of Poltava University of Economics and Trade. Series: Technical sciences*, (1). <https://doi.org/10.37734/2518-7171-2025-1-10> (in Ukrainian)
13. Kotelevych, V., Guralska, S., & Honcharenko, V. (2023). Quality and safety of food products - topical issues of the present. In *Proceedings of the scientific and practical online conference «Food safety and quality in the concept of «One Health»* (pp. 27–28). Lviv, Ukraine. <https://doi.org/10.32718/konf.1-2.06.2023> (in Ukrainian)
14. Sus, G., & Zagoruyko, D. (2023). Hygienic and ecological characteristics of the environment. In *Proceedings of the scientific and practical online conference «Food safety and quality in the concept of «One Health»* (pp. 86–88). Lviv, Ukraine. <https://doi.org/10.32718/konf.1-2.06.2023> (in Ukrainian)
15. TerraCycle. (n.d.). *Recycle the unrecyclable with TerraCycle*. <https://www.terracycle.com/en-US/?srsId=AfmBOoqgqfbj83Lc2PMfafmJBHBdEfSjZqZeURMTWApMxPp-RDjPoXZg>
16. Law of Ukraine No. 2320-IX. (2026). *On waste management*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text> (in Ukrainian)
17. State Service of Ukraine on Food Safety and Consumer Protection. (n.d.). *Food safety: Special requirements for labelling of baby food*. <https://dpss.gov.ua/news/bezpechnist-kharchovykh-produktiv-osoblyvi-vymohy-do-markuvannia-dytiachoho-kharchuvannia> (in Ukrainian)
18. *Regulation (EU) 2025/351 on plastic materials and articles intended to come into contact with food*. (2025). <https://www.ctec.lv/ua/evropeyska-ce-sertifikaciya/plastic-materials-food-packaging>

19. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. (n.d.). *What is environmental labelling?* [https://mepr.gov.ua/biznesu/ekologichne-markuvannya/shho-take-ekologichne-markuvannya/#:~:text=\(in Ukrainian\)](https://mepr.gov.ua/biznesu/ekologichne-markuvannya/shho-take-ekologichne-markuvannya/#:~:text=(in%20Ukrainian))
20. Law of Ukraine No. 2639-VIII. (2026). *On information for consumers on food products.* <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2639-19#n638> (in Ukrainian)
21. State Service of Ukraine on Food Safety and Consumer Protection. (n.d.). *Food safety: Labelling of baby food.* <https://dps.gov.ua/news/bezpechnist-kharchovykh-produktiv-markuvannya-dytiachoho-kharchuvannya> (in Ukrainian)
22. Polivoda, Yu. (n.d.). *Ecological products and eco-labelling in the food segment.* <https://qualityexpert.com.ua/articles/698883-ekologichna-produktsiya-ta-ekomarkuvannya-v-kharchovomu-sehmenti> (in Ukrainian)
23. Punda, O. O., Arziantseva, D. A., & Zakharkevych, N. P. (2025). Implementation of environmental labelling standards as a tool for consumer protection. *Science and Technology Today, electronic journal.* 3(44). 190-202. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-3\(44\)-190-202](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-3(44)-190-202) (in Ukrainian)

Submission received: 23.03.2026 / Revised: 24.04.2026 / Accepted: 30.04.2026 / Published: 30.05.2026

Н. І. ЧЕРЕВИЧНА¹, канд. техн. наук, доц.,

доцент кафедри готельного, ресторанного бізнесу і крафтових технологій

e-mail: natalia.cherevychna@hneu.net ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6660-5366>

Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця

пр. Науки, 9а, Харків, 61166, Україна

Д. П. КРАМАРЕНКО¹, канд. техн. наук, доц.,

доцент кафедри готельного, ресторанного бізнесу і крафтових технологій

e-mail: kramarenkodp@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1353-686X>

Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця

пр. Науки, 9а, Харків, 61166, Україна

Н.І. ГІРЕНКО, канд. техн. наук, доц.,

доцент кафедри професійної освіти, ресторанного і туристичного бізнесу

e-mail: n.i.hirenko@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6854-8257>

Луганський національний університет імені Тараса Шевченка

вул. Віктора Новікова, 2, Лубни, 37500, Україна

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИРОБНИЦТВА ПРОДУКТІВ ДИТЯЧОГО ХАРЧУВАННЯ

Мета. Дослідження сучасного стану ринку продуктів дитячого харчування в Україні з погляду на екологічні аспекти виробництва, управління якістю та безпечністю сировини та готової продукції, питання екологічного маркування та гармонізації вітчизняного законодавства у сфері дитячого харчування з європейськими нормами.

Методи. Системно-структурний, абстрактно-логічний, статистичний метод, методи індукції, дедукції, порівняння, а також системно-аналітичний метод.

Результати. Наведено вітчизняну (товарознавчу та медичну) та європейську класифікацію дитячого харчування. Визначено, що 64 % українського ринку складає імпорتنі продукти (переважно бренди Nestlé, Danone, HiPP), які мають переваги завдяки використанню спеціалізованих європейських сировинних зон. Надано характеристику вітчизняних виробників дитячого харчування, які складають певну конкуренцію імпортним аналогам. Відзначено, що деякі з них впроваджують екологічні інновації у виробництво та пакування. Висвітлено вплив новітніх законодавчих змін 2025–2026 років щодо екологічного маркування, контролю безпеки та екологічної чистоти продуктів дитячого харчування. Це свідчить про суттєве зміщення вектору екологізації на законодавчому рівні у бік гармонізації українського законодавства з європейським. Досліджено проблему грінвошингу в Україні та дієвість вітчизняної законодавчої бази у боротьбі з неправомірним використанням псевдоекологічного маркування.

Висновки. Підтверджено, що впровадження системи екологічного маркування є ключовим превентивним механізмом гарантування безпечності дитячого харчування. Світові та українські соціологічні дослідження демонструють високий попит на органічне дитяче харчування. Проте поширення грінвошингу знижує довіру українських покупців до локальних брендів на користь європейських. Подолання цієї проблеми та орієнтація на концепцію «Zero Waste» і сталий розвиток є критично важливими для підвищення конкурентоспроможності вітчизняних виробників.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: дитяче харчування, екологічна безпека, екологічне маркування, спеціалізовані сировинні зони, грінвошинг, органічна продукція, європейська інтеграція

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувалися 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. Слива Ю. Наукові основи концепції управління безпечністю харчових продуктів згідно з вимогами міжнародних стандартів. *Товарознавчий вісник*. 2021. Вип. 14. <https://doi.org/10.36910/6775-2310-5283-2021-14-10>
2. Проблеми екологічної безпечності харчових продуктів в Україні / Н. Букалова та ін. *Безпечність та якість харчових продуктів у концепції «Єдине здоров'я»* : матеріали наук.-практ. онлайн конф. (Львів, 1–2 черв. 2023 р.). Львів, 2023. С. 10–11. <https://doi.org/10.32718/konf.1-2.06.2023>
3. Носік В. В. Правові проблеми виробництва сільськогосподарської сировини для дитячого харчування. *Аналітично-порівняльне правознавство*. 2024. № 1. URL: <https://journal-app.uzhnu.edu.ua/article/view/299967?utm>
4. Речун О. Ю., Ткачук В.В. Використання біорозкладних полімерів та антимікробних пакувальних матеріалів у пакуванні харчових продуктів. *Товарознавчий вісник*. 2022. Вип. 15. <https://doi.org/10.36910/6775-2310-5283-2022-15-24>
5. Речун О. Ю., Передрій О. І. Активне та розумне пакування харчових продуктів. *Товарознавчий вісник*. 2021. Вип. 14. С.65-77. <https://doi.org/10.36910/6775-2310-52832021-14-7>
6. Технологія виготовлення екологічно безпечних пакувальних матеріалів на основі паперу та картону. URL: <https://ela.kpi.ua/bitstreams/5ae1a15c-7ffc-45e1-a0b6-408b9ba9ab91/download> (дата звернення 15.03.2026)
7. Принципи впровадження екологічного маркування продукції / Є. О. Михайлова та ін. *Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура*. 2018. Вип. 144. С. 43–50. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/kgm_tech_2018_144_8
8. Берзіна С. В. Екосертифікація харчових продуктів для вітчизняного та ЄС-ринку. 2024. URL: https://livingplanet.org.ua/images/2024/29_09_2024_ecosertification_berzina.pdf
9. Ткаченко Н. Особливості класифікацій продуктів дитячого харчування в Україні та світі. *Food Science and Technology*. 2016. Vol. 10, № 1. <https://doi.org/10.21691/fst.v10i1.73>
10. Регламент (ЄС) № 609/2013 Європейського Парламенту та Ради від 12 червня 2013 року про харчові продукти, призначені для немовлят і дітей раннього віку, харчові продукти для спеціальних медичних цілей та замітники цілого добового раціону для контролю ваги. URL: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2013:181:0035:0056:en:PDF>
11. Колбіна Н. Г. Шляхи вдосконалення адміністративно-правового регулювання виробництва та обігу дитячого харчування. *Київський часопис права*. 2022. № 1. С. 117–122. <https://doi.org/10.32782/klj/2022.1.18>
12. Тягунова Н. М. Асортиментна політика та особливості організації торгівлі органічним дитячим харчуванням в Україні. *Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі. Серія: Технічні науки*. 2025. № 1. <https://doi.org/10.37734/2518-7171-2025-1-10>
13. Котелевич В., Гуральська С., Гончаренко В. Якість і безпечність харчових продуктів – актуальні питання сьогодення. *Безпечність та якість харчових продуктів у концепції «Єдине здоров'я»* : матеріали наук.-практ. онлайн конф. (Львів, 1–2 черв. 2023 р.). Львів, 2023. С. 27–28. <https://doi.org/10.32718/konf.1-2.06.2023>
14. Сус Г., Загоруйко Д. Гігієнічна і екологічна характеристика середовища. *Безпечність та якість харчових продуктів у концепції «Єдине здоров'я»* : матеріали наук.-практ. онлайн конф. (Львів, 1–2 черв. 2023 р.). Львів, 2023. С. 86–88. <https://doi.org/10.32718/konf.1-2.06.2023>
15. *Recycle the unrecyclable with TerraCycle*. URL: <https://www.terracycle.com/en-US/?srsId=AfmBOoqgqfbj83Lc2PMfadmJBHbDEfSJZqZeURMTWApmxPp-RDjPoXZg>

16. Про управління відходами: Закон України від 20 черв. 2022 р. № 2320-IX. Редакція від 02.03.2026. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text> (дата звернення 15.03.2026)
17. *Безпечність харчових продуктів: особливі вимоги до маркування дитячого харчування*. Держпродспоживслужба. URL: <https://dpss.gov.ua/news/bezpechnist-kharchovykh-produktiv-osoblyvi-vymohy-do-markuvannia-dytiachoho-kharchuvannia> (дата звернення 15.03.2026)
18. Регламент (ЄС) 2025/351 щодо пластикових матеріалів та виробів, призначених для контакту з харчовими продуктами. URL: <https://www.ctec.lv/ua/evropeyska-ce-sertifikaciya/plastic-materials-food-packaging> (дата звернення 15.03.2026)
19. *Що таке екологічне маркування?* Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. URL: <https://mepr.gov.ua/biznesu/ekologichne-markuvannya/shho-take-ekologichne-markuvannya/#:~:text> (дата звернення 15.03.2026)
20. Про інформацію для споживачів щодо харчових продуктів : Закон України від 06 груд. 2018 р. № 2639-VIII. Редакція від 02.03.2026. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2639-19#n638> (дата звернення 15.03.2026)
21. *Безпечність харчових продуктів: маркування дитячого харчування*. Держпродспоживслужба. URL: <https://dpss.gov.ua/news/bezpechnist-kharchovykh-produktiv-markuvannia-dytiachoho-kharchuvannia> (дата звернення 15.03.2026)
22. Полівода Ю. Екологічна продукція та екомаркування в харчовому сегменті. *Quality Expert*. URL: <https://qualityexpert.com.ua/articles/698883-ekologichna-produktsiya-ta-ekomarkuvannya-v-kharchovomu-sehmenti> (дата звернення 15.03.2026)
23. Пунда О. О. Арзянцева Д. А., Захаркевич Н. П. Впровадження стандартів екологічного маркування як інструменту захисту прав споживачів. *Наука і техніка сьогодні*. 2025. № 3 (44). С. 190–202. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-3\(44\)-190-202](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-3(44)-190-202)

Отримано: 23.03.2026 / Переглянуто: 24.04.2026 / Прийнято: 30.04. 2026 / Опубліковано: 30.05.2026

<https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-12>

УДК (UDC): 338.48- 6:7/8(477)

Л. В. КОВАЛЬСЬКА, канд. географ. наук,
доцент кафедри туризмознавства і краєзнавства,
e-mail: lesia.kovalska@cnu.edu.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7582-8249>

Карпатський національний університет імені Василя Стефаника,
вул Галицька 201 Б., м. Івано-Франківськ, 76000, Україна

О. Г. ПАРХОМЕНКО, канд. географ. наук,
доцент кафедри екології, географії та природокористування,
e-mail: sasho1979turizm@ukr.net ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7939-9576>

Національний університет "Чернігівський колегіум" імені Т.Г. Шевченка
вул. Гетьмана Полуботка, 53, м. Чернігів, 14013, Україна

М. М. ЛУЦІВ,
магістр,
e-mail: mariia.lutsiv.21@pnu.edu.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-3802-6352>

Карпатський національний університет імені Василя Стефаника,
вул Галицька, 201 Б., м. Івано-Франківськ, 76000, Україна

МУРАЛИ ЯК ЕЛЕМЕНТ УРБАНІСТИЧНОГО МИСТЕЦТВА ТА ЧИННИК РОЗВИТКУ МІСЬКОГО ТУРИЗМУ (НА ПРИКЛАДІ м. ІВАНО-ФРАНКІВСЬК)

Мета. Здійснити комплексний аналіз муралів м. Івано-Франківськ як об'єктів міського культурного простору та туристичної привабливості;

Методи. Аналізу та синтезу, систематизації та класифікації, картографічний, описовий.

Результати. Муралі м. Івано-Франківськ є важливим елементом міського культурного ландшафту та потенційним ресурсом для розвитку культурно-пізнавального туризму. З аналізу геопросторового розміщення та змісту муралів у м. Івано-Франківськ розроблено туристичний арт-маршрут у межах міста. Встановлено, що своєрідність мурал-продукту для екскурсійних послуг полягає у їх постійному оновленні об'єктів. Зазначено, що одним із важливих аспектів просування екскурсійного продукту «Муралі Прикарпаття» є ознайомлення місцевих мешканців із цим мистецтвом та його культурою, а серед митців-аматорів – поширення «кодексу етики» райтерів (муралістів). Виявлено, що основним негативним чинником у просуванні арт-культурного продукту на ринок туристичних послуг є відсутність фахівців-екскурсоводів з муралізму.

Висновки. Геопросторова структура створює передумови для використання муралів як елементів міського культурного ландшафту та перспективних об'єктів туристичної привабливості. Їх поєднання з іншими культурними та історичними локаціями міста дозволить створити нові формати екскурсійних програм, що сприятимуть диверсифікації туристичного продукту.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: мурал, туристичний маршрут, Івано-Франківськ, арт-культурний продукт, фахівець-екскурсовод з муралізму

Як цитувати: Ковальська Л. В., Пархоменко О. Г., Луців М. М. Муралі як елемент урбаністичного мистецтва та чинник розвитку міського туризму (на прикладі м. Івано-Франківськ). *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2026. Вип. 45. С. 149–162. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-12>

In cites: Kovalska, L. V., Parkhomenko, O. H., & Lutsiv, M. M. (2026). Murals as an element of urban art and a factor in the development of urban tourism (a case study of Ivano-Frankivsk). *Man and Environment. Issues of Neoeology*, (45), 149–162. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-12>

Вступ

У період трансформації суспільства, розвитку особистості, міжкультурної комунікації, прагнення до збагачення знаннями, зростання інтелектуального потенціалу та розвитку креативності створюються умови для зростаючого попиту на культурний продукт. Тому, у наш час, поряд із загальними культурними та історичними ресурсами відбувається інтенсивний пошук альтернативних ресурсів для диверсифікації туристичної пропозиції. Серед останніх вагоме місце посіли мурали, як вид вуличного мистецтва, що включає в себе розфарбовані або намальовані на стінах будівель графічні або художні зображення. Вони створені як індивідуально так й ініціативною групою аматорів і/або художників. Ці твори вирізняються значними розмірами.

У дослідженні муралів як об'єктів туристичного інтересу часто використовується запропонована британським дослідником міського мистецтва класифікація стріт-арту Шактера Р. [1], де виокремлено такі типи стріт-арту, які можуть бути адаптовані для аналізу муралів як туристичних атракцій:

1. Меморіальні мурали – присвячені історичним подіям, видатним особистостям, національній пам'яті.
2. Соціально-критичні мурали – відображають актуальні суспільні проблеми, громадянську позицію, ідеї солідарності чи протесту.
3. Декоративно-естетичні мурали – спрямовані на візуальне оновлення міського середовища, формування привабливого урбаністичного ландшафту.
4. Ідентифікаційні (локально-брендові) мурали – репрезентують культурну специфіку території, локальні символи та сприяють формуванню туристичного іміджу міста.

Згідно з технікою та способами створення муралів, на основі узагальнення наукових [2] і довідкових джерел, пропонуємо зведену авторську класифікацію муралів:

– традиційний мурал – мурал, який розфарбований на стінах будівель за допомогою кольорових фарб [3];

– 3D-мурал – створений з використанням технології тривимірного малювання, що надає зображенню об'ємності і глибини [4];

– графіті-мурал – створений з використанням аерозольних фарб [5];

– мозаїчний мурал – створений з використанням плитки, скла або інших матеріалів, що зібрані у формі зображення;

– абстрактний мурал – намальований у вільному стилі, з використанням абстрактних форм та кольорів.

В Україні основним джерелом інформації про створення муралів у різних містах є повідомлення в ЗМІ, інформація на електронних ресурсах, веб-сайтах тощо. Нині такі зображення виступають важливим інструментом для залучення громадської уваги до мистецтва; взаємодії з аудиторією, яка може бути більш різноманітною та ширшою, ніж у традиційних музеях чи галереях; забезпечення доступності до мистецтва всіх, незалежно від статусу, віку, соціального стану; зміни зовнішнього вигляду міст і прилеглих територій. Яскравість та унікальність сучасного вуличного мистецтва є джерелом стимулювання територіальних громад та підприємницьких структур у відведенні місць для муралів, а також відкриття магазинів, галерей та їх виставок, проведення аукціонів творів митців з метою залучення молодого покоління до креативного мистецтва. Муралі стають не лише частиною місцевого культурного колориту, але й потужним інструментом для залучення туристів. Тому використання муралів у туризмі набуває все більшої популярності в усьому світі. Слід зазначити, що вуличне мистецтво по-різному сприймається як стейкхолдерами культурного та туристичного сегменту так і представниками місцевої влади і відрізняється за країнами [6]. Наприклад, у Німеччині на залишках Берлінської стіни зображено муралі історичної тематики, які стали популярними серед туристів і є символами єднання та мистецтва. В Іспанії м. Валенсія прославилося своїми футуристичними та вражаючими муралами, які стали об'єктом привабливості для туристів. Одним із центрів екскурсійного стріт-арту у США є м. Нью-Йорк (район Бруклін). У Брістолі (Велика Британія) творчість місцевих та світових художників вшановується під час проведення культурного стріт-арт фестивалю Banksy, в Індії – St+art Умаг, де на муралах представлена традиційна індійська культура та її співіснування із сучасністю. Хоча муралі часто розглядаються як засіб для облашту-

вання міського простору та вираження творчого вишукування, існують деякі негативні аспекти, пов'язані з їхнім використанням.

Мурали часто зображені на історичних або культурних будівлях, порушуючи їхню автентичність та вигляд, що може призвести до втрати спадщини та знищення архітектурного обличчя міста. Інколи спостерігається зацікавленість корпорацій та комерційних інтересів до використання муралів як інструменту реклами, що може змінити їхню первісну мету вираження мистецтва та культури.

Яжджевська І. стверджує, що мурали у м. Лодзь (Польща) не мають національного та міжнародного визнання. Вони не підготовлені для іноземних туристів (окрім польської немає муралів іншими мовами) хоча мають потенціал для підвищення пізнаваності міста. Однак шанувальники вуличного мистецтва часто розміщують у туристичних блогах інформацію про подорожі, зокрема, мурали. Це є яскравим прикладом застосування цифрового контенту та соціальних мереж для вивчення туристичного потенціалу муралів [7].

Скіннер Дж., Джоліфф Л. стверджують, що туристів у всьому світі приваблюють мурали-фрески як туристична пам'ятка та як аспект матеріальної культури. Часто вона асоціюється з політикою, культурною спадщиною та ідентифікує місце, яке відвідують. Автори наголошують, що мурал і туризм буде цінним для тих, хто цікавиться культурною географією, туризмом, дослідженнями історичної спадщини та мистецтвом [8].

Івей Ж., Хасна М. стверджують, що мурали стали рекомендованими об'єктами для туристів, тому вони є на різних туристичних веб-сайтах. Вони покращують міську ідентичність та дух громади, сприяють формуванню місць та культурному самовираженню, а також підвищують економічну привабливість туристичної дестинації [9].

У наукових національних розробках Провотар Н., Олішевська Ю., Мезенцева К., Кравченко К. висвітлено тенденцію до децентралізації розміщення об'єктів вуличного мистецтва у міському просторі [10].

У національній науковій літературі проблематика муралів досліджується переважно у контексті розвитку стріт-арту, урбаністичної культури та трансформації міського культурного простору.

Зокрема, дослідники Романіва О., Рибачка О., Савельєва Д. [11] розглядають окремі аспекти інноваційного туристичного продукту «Стріт-арт Житомира» та зазначають його вплив на туристичний імідж м. Житомир.

Праця Бітаєвої Г. розкриває ключові позиції у формуванні концептуальної та ідеологічної складової муралів, причини феномену активної взаємодії стінописів із туристами [12].

Батенко А. вивчала вплив мурал-арту на особистісне сприйняття та на прикутість уваги до соціально-політичних проблем у міському контексті. На її думку стінописи мають художню цінність, унікальний смисловий посил, а не є лише засобом естетизації [13].

Стаття Гаврилюка Б. присвячена аналізу українського мурал-арту у контексті світового мистецтва. Автором доведено, що мурал-арт є сучасним проявом класичних настінних розписів і засобом комунікації із соціумом, спонукає українських художників до постійної інтеграції, подорожей, пошуку нових способів самовираження у мультикультурному світі [14].

Функціонування муралів у соціокультурному контексті сучасності розглядає Гаврилаш І. Авторка акцентує увагу на мурал-арт, як вид духовно-практичної діяльності людини, що не лише відображає картину суспільної свідомості, але й призводить до трансформації соціокультурного простору [15].

Крім того, у новітніх дослідженнях українських мистецтвознавців мурали розглядаються як форма художньої реакції на суспільно-політичні процеси. Зокрема, Худякова А. аналізує розвиток антивоєнних муралів у період російсько-української війни, підкреслюючи їхню символічну та комунікативну роль у формуванні суспільних наративів і культурної пам'яті [16].

Таким чином, аналіз праць українських вчених свідчить про те, що мурали дедалі частіше розглядаються як важливий елемент урбаністичного мистецтва та культурного простору міста. Водночас, у сучасних дослідженнях лише частково висвітлено питання використання муралів як туристичних атракцій та елементів туристичної інфраструктури, що зумовлює необхідність подальшого наукового аналізу цього явища, зокрема, на прикладі окремих міст України.

Серед невирішених питань вуличного мистецтва є їх геопросторова концентрація у

міському просторі, оновлення їх тематики, розміщення та регулювання на засадах партисипативного міського планування.

Мета – здійснити комплексний аналіз муралів м. Івано-Франківськ як об'єктів міського культурного простору та туристичної привабливості.

Методи дослідження

Для опрацювання наукових підходів до трактування муралів як елементів міського культурного простору та об'єктів туристичної привабливості використано метод аналізу та синтезу. З метою впорядкування муралів м. Івано-Франківськ за тематичними, просторовими та функціональними ознаками застосовано метод систематизації та класифікації.

Порівняльний метод дозволив зіставити практики інтеграції стріт-арту у туристичний простір інших міст України та зарубіжжя з досвідом м. Івано-Франківськ.

Результати дослідження та обговорення

Поява перших масштабних муралів у місті пов'язана з діяльністю громадських ініціатив, мистецьких фестивалів і локальних урбаністичних проєктів. Серед них важливу роль відіграли проєкти Urban Space 100 (з 2015 р. функціонує як платформа для розвитку міста Івано-Франківськ, ініційований ГО «Тепле Місто») та Porto Franko (з 2010 до 2018 рр., ініційований ГО «Інша Освіта» у співпраці з локальними культурними діячами), у межах яких було створено низку настінних розписів у різних частинах міста.

Муралі у м. Івано-Франківськ вирізняються територіальною концентрацією, функціональною роллю у міському просторі та потенціалом використання у туристичній діяльності. Розміщення їх на фасадах житлових будинків, громадських будівель забезпечує їхню візуальну доступність у міському середовищі. У просторовій структурі міста вони розміщені нерівномірно та утворюють територіальні осередки (центральна частина міста, житлові мікрорайони та локальні кластери муралів).

Перший осередок охоплює центральну частину м. Івано-Франківськ та прилеглі квартали історичного ареалу поблизу головних вулиць. Наприклад, мурал «Спільні

Дослідницькі завдання включають: визначення геопросторової організації муралів у м. Івано-Франківськ; опис характеристики об'єктів стріт-арту міського простору; створення арт-туристичного маршруту; визначення впливу вуличного мистецтва на соціокультурний простір міста.

Просторовий (картографічний) аналіз застосовано для дослідження розміщення муралів у структурі міського середовища та оцінювання потенціалу їх включення до туристичних маршрутів.

Для характеристики художніх, символічних і змістових особливостей муралів використано описовий метод, а метод контент-аналізу – для опрацювання інформаційних джерел, публікацій у медіа та матеріалів туристичних ресурсів щодо їх функціонування як об'єктів туристичного інтересу.

межі» створено на фасаді будинку на вул. Франка, 5 (рис. 1). Тут муралі виконують переважно репрезентативну та культурно-комунікативну функцію, оскільки розташовані в районах з активними туристичними потоками та історичною забудовою. Завдяки близькості до основних туристичних маршрутів такі об'єкти формують додаткові локації туристичного інтересу.

Другий осередок характеризується найбільшою концентрацією настінних розписів та охоплює житлові мікрорайони міста, зокрема житлову забудову другої половини ХХ ст. У цих районах муралі виконують роль естетичного оновлення житлового середовища, а масштабні фасади будинків забезпечують достатню площу для створення великих художніх композицій.

Наприклад, на стіні житлового будинку по вул. Івасюка, 80 (рис. 2) створено мурал місцевим художником і скульптором Григоряном С. На стінописі зображена осінь (синиці, опале листя яблуні, жовті тони), площею 700 м². Мурал, на якому зображені підлітки, які займаються спортом, катаються на двоколіснику та вживають здорового їжу презентований на будинку, що на вул. Стуса, 1 (рис. 3).



Рис. 1 – Мурал «Спільні межі» на вул. Франка, 5
Fig. 1 – Mural “Shared Borders” on Franka Street, 5



Рис. 2 – Мурал Осінні мотиви на вул. Івасюка, 80
Fig. 2 – Mural “Autumn Motifs” on Ivasyuka Street, 80



Рис. 3 – Мурал на вулиці Стуса, 1.
Fig. 3 – Mural on Stusa Street, 1

Доповнює цей осередок колекція муралів на фасадах новобудов та огорож (рис. 4–6), де живопис використовується як елемент архітектурного дизайну та візуального брендингу території. У сучасних житлових проєктах мурали виконують декоративну функцію та підкреслюють індивідуальність житлового середовища. Вони інтегруються у загальну концепцію благоустрою та формують нові акценти міського простору. Зокрема, мурал «Пазли» виконаний на фасаді нового будинку житлового комплексу «Привокзальний», що на вул. Вовчинецькій, 55 є абстрактним зображенням з елементами графіті, що викликає інтерес серед туристів. В основі стінопису – знакова система, обіграна у трендах соціального дизайну та мінімалізму Мурал на новобудові має зашифрований зміст. Такого роду мурали стають елементом архітектурного дизайну та маркетингового позиціонування житлових комплексів.

Аналіз просторового розміщення муралів у м. Івано-Франківськ дозволяє виявити основні закономірності їх територіальної локалізації та визначити характер просторової концентрації цих об'єктів. У структурі міського простору простежується такі типи розміщення муралів:

1. Лінійна концентрація спостерігається вздовж основних транспортних магістралей та великих вулиць міста. У таких випадках мурали розташовуються послідовно на фасадах будівель, формуючи своєрідні візуальні коридори. Подібна локалізація забезпечує високу видимість настінних розписів та сприяє їх сприйняттю широким колом мешканців і відвідувачів міста. Така локалізація забезпечує

високу візуальну доступність об'єктів і сприяє формуванню впізнаваного міського образу. Крім того, мурали, розташовані вздовж вулиць, наприклад, по вул. Івасюка та Вовчинецька, виконують функцію своєрідних візуальних маркерів окремих районів.

2. Кластерна (осередкова) концентрація характерна для окремих житлових кварталів або будинків, де розміщується деякі мурали у безпосередній близькості один до одного, що утворює своєрідні «муральні осередки». Такі локації мають потенціал для формування тематичних мистецьких маршрутів і можуть використовуватися як окремі туристичні об'єкти/локації чи бути включеними до маршрутів. Наприклад, будинок на вул. Хоткевича, 54 має одразу декілька стінописів (близько дев'яти), зокрема мурали «Українка», «Дівчина з птахом», «Соняшники» та інші композиції, що створюють цілий тематичний мистецький простір. Наявність декількох художніх робіт на одному об'єкті формує своєрідний локальний центр стріт-арту та підвищує туристичну привабливість цієї локації.

3. Дисперсне (розсіяне) розміщення проявляється у випадках, коли окремі мурали розташовані у різних частинах міста без чіткої територіальної концентрації. Такий тип локалізації характерний для об'єктів, створених у різні періоди та в межах різних мистецьких ініціатив. Прикладом є мурал «Пазли» на фасаді будинку вул. Вовчинецька, 55, а також мурал «Спільні межі» на будинку вул. Франка, 33. Таке розміщення формує розгалужену мережу об'єктів стріт-арту у різних районах міста.



Рис. 4 – Мурал Герою Небесної сотні – Роману Гураку
Fig. 4 – Mural by the Hero of the Heavenly Hundred – Roman Gurak



Рис. 5 – Концептуальний мурал на огорожі
Fig. 5 – Conceptual mural on the fence



Рис. 6 – Мурали на багатоповерхівках
Fig. 6 – Murals on high-rise buildings

Розмаїття творів у різних стилях вносить неповторний колорит у місто та дозволяє розглядати його не лише як провідний індустріальний центр України, але і як локацію креативної культури. На муралах м. Івано-Франківськ часто зображено духовну суть українського народу, дух незламності

та глибокого вірування в Єдиного Бога. У переважній більшості такі сакральні-тематичні зображення представлені на державних будівлях. Наприклад, неподалік Вічевого Майдану, на одному із корпусів Івано-Франківського медичного університету (рис. 7, 8).



Рис. 7 – Креативна ідея мораліста
Fig. 7 – Creative idea of a muralist



Рис. 8 – Мурал – «Єдність України»
Fig. 8 – Mural – «Unity of Ukraine»

Мурали як форма сучасного публічного мистецтва відіграють важливу роль у формуванні візуального образу міста та розвитку його культурного середовища.

З туристичної точки зору мурали виступають як окремі об'єкти культурного інтересу та як складові комплексних туристичних маршрутів, що сприяє диверсифікації туристичного продукту.

Особливо перспективним є використання муралів у межах тематичних маршрутів сучасного мистецтва, креативних просторів та урбаністичної культури.

На основі наявних об'єктів вуличного мистецтва у м. Івано-Франківськ запропоновано тематичний туристичний маршрут

«Мурали Прикарпаття» (рис. 9), який передбачає ознайомлення з найвідомішими настінними розписами міського простору. Маршрут орієнтований на поєднання культурно-пізнавального туризму та урбаністичного стріт-арту, що дозволяє розширити традиційні туристичні локації міста та залучити відвідувачів до нових культурних просторів.

Маршрут має лінійно-кільцеву просторову структуру, що поєднує центральну частину міста з прилеглими житловими районами. Основна форма переміщення – пішохідна, однак окремі ділянки можуть передбачати використання електросамокатів або велосипедів через віддаленість окремих об'єктів. Такий формат дозволяє охопити бі-

льшу кількість муралів, розташованих у різних функціональних зонах міста.

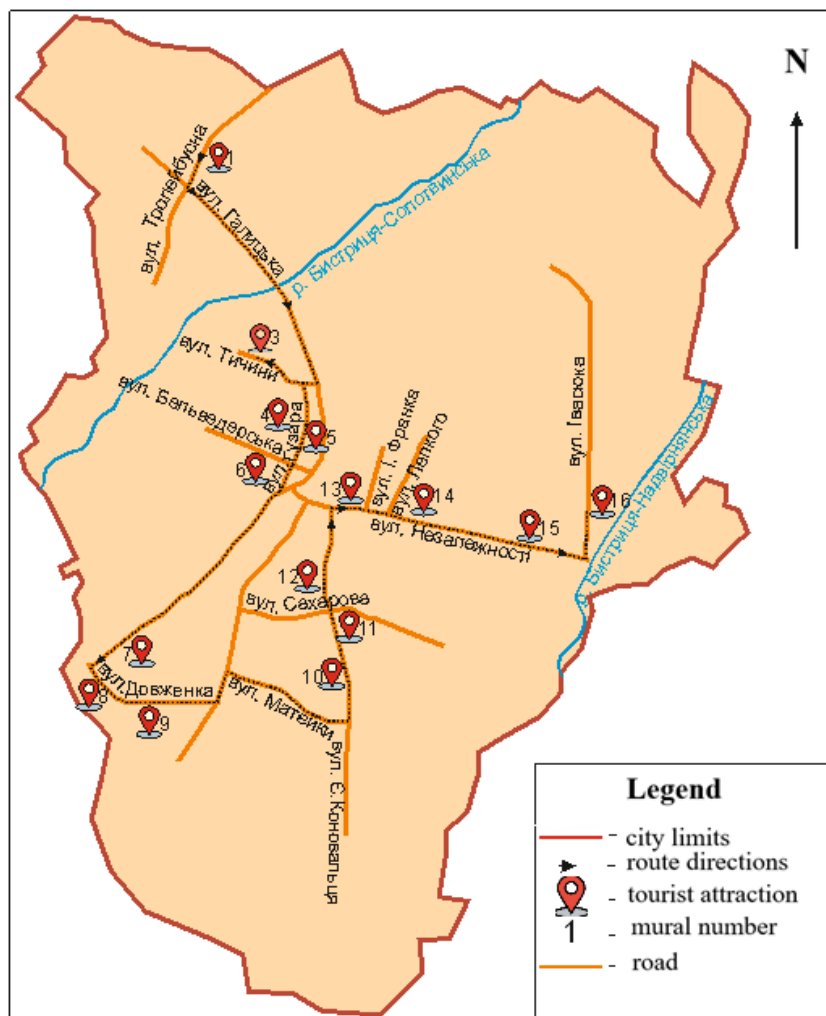
Загальна протяжність маршруту становить 6 км. Тривалість проходження маршруту становить 3 год. Такий час включає переміщення між об'єктами, огляд муралів, інформаційні розповіді екскурсовода. При проведенні екскурсій з детальним мистецтвознавчим аналізом тривалість маршруту становитиме 4 год.

Маршрут проходить через функціональні зони міста:

а) центральну частину міста (початок маршруту), де туристи знайомляться з настінними розписами історико-культурної та символічної тематики, присвяченими відомим українським діячам культури та духовності;

б) громадські простори та культурні локації – ділянки маршруту, де мурали поєднані з культурними об'єктами, освітніми установами та громадськими будівлями;

в) житлові мікрорайони міста, де створено найбільші за площею мурали.



1 – «Гуцулка з ноутбуком – минуле і сучасне», 2, 3, 5, 8, 13, 15 – Feros/Dilk, 4 – «Григорій Сковорода», 6 – «Іван Франко», 7 – «Казковий політ», 9 – «Діти», 10 – «Квітка Цісик», 11 – «Фрагменти візуальної маніпуляції», 12 – «Тарас Шевченко з NLAW», 14 – «Шнурки любові», 16 – «Осінній мурал з синичками». /

1 – «Hutsul girl with a laptop – past and present», 2, 3, 5, 8, 13, 15 – Feros/Dilk, 4 – «Hryhorii Skovoroda», 6 – «Ivan Franko», 7 – «Fairy Flight», 9 – «Children», 10 – «Kvitka Cisyk», 11 – «Fragments of Visual Manipulation», 12 – «Taras Shevchenko with an NLAW», 14 – «Laces of love», 16 – «Autumn mural with tits (birds)».

Рис. 9 – Туристичний маршрут «Муралі Прикарпаття»

Fig. 9 – Tourist itinerary «Prykarpattia Murals»

Основні зупинки маршруту, котрий охоплює ознайомлення з такими арт-зображеннями:

1. Мурал «Гуцулка з ноутбуком – минуле і сучасне» (рис. 10) створений місцевими художниками Юрієм та Мартою Пітчуками, вважається одним з кращих серед вуличного мистецтва України. Ідеєю даного муралу є розвиток сучасних ІТ-технологій, при цьому не втрачаючи національну культуру, історію та традиції.

2. Мурал «Іван Франко» (рис. 11). Автором цього твору є художник Роман Бончук. Під зображенням письменника написана фраза «Я син народу, що вгору йде».

Ідея цього муралу – піднесення патріотичного духу нашого народу та надання надії в майбутнє нашої держави.

3. Мурал «Тарас Шевченко з NLAW» (рис. 12) черговий зразок мистецтва художника Романа Бончука. Мешканці міста знають цей мурал як «Шевченко з джавеліном». Мурал підписано рядками з поеми «Кавказ»: «Борітеся – поборете, Вам Бог помагає!».

4. Мурал Олега та Юлії-Марії Цьомка презентує двоє дітей (рис. 13). Цей мистецький твір слугує своєрідним закликом до проведення активного дозвілля на лоні природи. Також він звертає увагу на сучасну проблему молодого покоління – надмірне проведення часу у різних гаджетах.



Рис. 10 – Мурал «Гуцулка з ноутбуком», вул. Тролейбусна, 4

Fig. 10 – Mural «Hutsulka with a laptop», 4, Trolleybusna, Str.



Рис. 11 – Мурал «Іван Франко», вул. Бельведерська, 19
Fig. 11 – «Ivan Franko» mural, 19, Belvederska, Str.



Рис. 12 – Мурал «Тарас Шевченко з NLAW», вул. Коновальця, 16
Fig. 12 – Mural «Taras Shevchenko from NLAW», 16, Konovaltsia, Str.



Рис. 13 – Мурал «Діти», вул. Довженка, 11А
Fig. 13 – «Children» mural, 11A, Dovzhenka, Str.

5. Митці Feros та Dilk (Сергій і Віталій Грех) створили ряд муралів, які прикрашають будівлю кінотеатру «Космос», стіни двору міської дитячої лікарні та інші

об'єкти. Також за ініціативи митця Dilk створено проект «Франківський вуличний малюнок» (рис. 14–19).



Рис. 14 – Мурал Feros/Dilk, вул. Л. Гузара (зупинка біля Bastionu)
Fig. 14 – Feros/Dilk mural, L. Huzara Str. (stop near Bastion)



Рис. 15 – Мурал Feros/Dilk в дворі, перехрестя вул. Л. Гузара та вул. Галицької
Fig. 15 – Feros/Dilk mural in the yard, intersection of L. Huzar, Str. and Halyska, Str.



Рис. 16 – Мурал Feros/Dilk, вул. Франка, 5
Fig. 16 – Feros/Dilk mural, 5, Franka, Str.



Рис. 17 – Мурал Feros/Dilk, кінотеатр «Космос»
Fig. 17 – Feros/Dilk mural, «Cosmos» cinema



Рис. 18 – Мурал Feros/Dilk на вул. Тичини, 10

Fig. 18 – Feros/Dilk mural, 10, Tyshyny, Str.



Рис. 19 – Мурал Feros/Dilk,

дворик ЖК Сонячний, вул. О. Довженка, 27

Fig. 19 – Feros/Dilk mural,

courtyard of the Sonyachny residential complex, 27, O. Dovzhenka, Str.



5. Митці Олег Цьомко та Зорян Суш створили мурал «Казковий політ» (рис. 20) у 2017 році. Тут зображена маленька дівчинка, яка літає в небі поруч з птахами. Мурал був реалізований з метою художнього осучаснення та візуального покращення міського середовища в межах північно-західної житлової частини міста Івано-Франківськ, яка охоплює,



Рис. 20 – Мурал «Казковий політ», вул. Мазепа, 177

Fig. 20 – Mural «Fairy Tale Flight», 177, Mazepu, Str.

зокрема, вулиці Довженка, Коновальця та Чорновола і прилеглі до них території.

7. У рамках проекту «Відкритий вуличний малюнок» львівський художник Сергій Радкевич створив мурал «Фрагменти візуальної маніпуляції» (рис. 21). Дана робота була створена після обговорень з місцевими жителями щодо доцільності створення муралів.



Рис. 21 – Мурал «Фрагменти візуальної маніпуляції», вул. Сахарова, 30А

Fig. 21 – Mural "Fragments of visual manipulation", 30A, Sakharova, Str.

8. Художник і скульптор Сергій Григорян створив «Осінній мурал з синичками» (рис. 22), що передає чудову атмосферу осені – зображення опалого листя, яблук та осілих птахів.

9. Олег Замора, Ірина Ковалевська та Віталій Білоусов-Вандяк стали авторами муралу, присвяченого Квітці Цісик (рис. 23).

10. Мурал, присвячений українському філософу, письменнику Григорію Сковороді, створений Романом Бончуком. Зображення Г. Сковороди, який ступає по розкритій книзі, супроводжується написом: «Духовна зброя сильніша за тілесну» (рис. 24). Присвячений цей стінопис 300-річчю з дня народження українського філософа-письменника.

11. Мурал «Шнурки любові» (рис. 25), створений львівською художницею Оленою Смагою. На стіні зображена рука Ісуса Христа та шнурки, які символізують поєднання з Богом.

Реалізація таких турів забезпечить соціально-економічний ефект, що проявлятиметься у зростанні доходів суб'єктів туристичної діяльності, зростанні кількості легальних муралів, інтенсифікації молодіжного культурно-історичного туризму.

Традиційними інструментами просування екскурсійного продукту «Мурали Прикарпаття» залишається друкована рекламна продукція (буклети, флаєри тощо), магніти із зображенням муралів, а також ЗМІ й Інтернет-ресурси.



Рис. 22 – «Осінній мурал з синичками», вул. Івасюка, 80
Fig. 22 – «Autumn mural with titmice», 80, Ivasyuka, Str.



Рис. 23 – Мурал, присвячений Квітці Цісик, вул. Матейки, 23
Fig. 23 – Mural dedicated to Kvitka Tsysyk, 23, Mateyki, Str.



Рис. 24 – Мурал «Григорій Сковорода», вул. Л. Гузара, 9
Fig. 24 – «Gryhoriy Skovoroda» mural, 9, L. Huzara, Str.

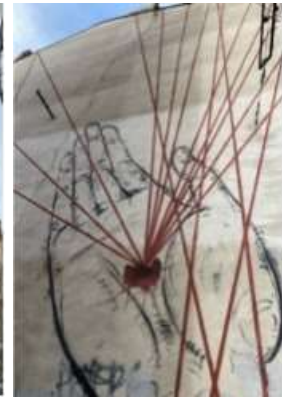


Рис. 25 – Мурал «Шнурки любові», вул. Б. Лепкого, 6а
Fig. 25 – «Lace of Love» mural, 6а. B. Lepkogo, Str

Просування арт-маршруту на ринок туристичних послуг є складним процесом, оскільки спостерігається відсутність фахівців-екскурсоводів, спеціалізованих у муралізмі. Це є одним з негативних чинників, що впливає на якість пропонованого туристичного продукту. Невідповідність фахової підготовки спеціалістів туристичного обслуговування до вимог сучасного конкуруючого на туристичному ринку культурного сегменту пояснюється відсутністю акредитаційної комісії з креативної арт-культури. Звідси випливає, що кадрово-організаційний аспект туристичного обслуговування (професійна підготовка спеціалістів-муралістів з туристичного супроводу, розробка технологічної карти арт-маршруту, портфеля екскурсовода та іншої методичної документації) у м. Івано-Франківськ утруднює якісну презентацію вуличного мистецтва.

Своєрідність мурал-продукту для екскурсійних послуг полягає у їх постійному оновленні новими об'єктами, які через погодні умови та інші чинники зовнішнього середовища можуть псуватися та руйнуватися. Враховуючи складність технології відновлення легальних муралів, ці об'єкти потребують постійного оновлення чи навіть створення заново. Цей процес вимагає фінансування, що, у переважній більшості, покладено на самих митців. Тому сьогодні, збереження муралів та іншого типу стінопису залишається невирішеним питанням, оскільки

деякі з них вже знищено у результаті утеплення стін житлових будинків та під впливом атмосферних явищ.

Рішенням зазначеної проблеми може стати впровадження комплексного пакету заходів, спрямованих на розвиток муралізму як туристичного ресурсу та інтеграцію міста в концепцію сучасного SMART-міста. До таких заходів належать: забезпечення фінансування з боку суб'єктів туристичного бізнесу, грантова підтримка та використання коштів місцевого бюджету для відновлення та збереження муралів; створення спеціалізованого веб-ресурсу, що функціонуватиме як онлайн-музей муралів м. Івано-Франківськ, забезпечуючи інформаційну доступність та підвищуючи привабливість туристичних маршрутів; організація курсів професійної підготовки муралістів із туристичного супроводу, поєднуючи мистецьку та сервісну складові.

У цифровізації туристичного продукту пропонується також розробка мобільного додатку, який дозволяє туристам знаходити всі настінні розписи міста на карті та планувати власний маршрут.

Включення мурал-маршрутів до маркових турів підвищить туристичну привабливість міської території та сприятиме формуванню нового креативного туристичного продукту, орієнтованого на задоволення культурних потреб відвідувачів. Популяризація та підтримка таких маршрутів суб'єкта-

ми туристичного бізнесу, органами місцевої влади та активною громадськістю забезпечить ефективне просування на ринку туристичних послуг та створить додаткові можли-

вості для залучення туристів. Усі зазначені заходи є складовими розвитку SMART-міста та цифровізації туристичної інфраструктури.

Висновки

Муралі у м. Івано-Франківськ є важливим елементом міського культурного ландшафту та потенційним ресурсом для розвитку культурно-пізнавального туризму. Їхня присутність у різних функціональних зонах міста сприяє формуванню локальних мистецьких осередків та урбаністичної ідентичності. Геопросторова структура муралів виступає елементом міського культурного ландшафту та перспективних об'єктів туристичної привабливості. Вони часто є окремими об'єктами культурного інтересу і складовими комплексних туристичних маршрутів. Особливо перспективним є використання муралів у межах тематичних маршрутів сучасного мистецтва, креативних просторів та урбаністичної культури.

Створення екскурсійного продукту «Муралі Прикарпаття» сприятиме залученню креативного молодого покоління в облаштуванні міського простору м. Івано-Франківськ, підвищить туристичний імідж міста та культурний рівень місцевого населення. Маршрут забезпечить комплексне ознайомлення з урбаністичним мистецтвом міста та слугуватиме формуванням креативного туристичного продукту.

Для ефективного розвитку муралізму як туристичного ресурсу необхідна комплексна підтримка з боку місцевої влади, суб'єктів туристичного бізнесу та громадськості, що включає фінансування, популяризацію маршрутів, професійну підготовку муралістів і залучення інноваційних цифрових технологій. Такий підхід забезпечує формування сталого та конкурентоспроможного культурного продукту для міського туризму.

Важливим є також виділення для муралістів локацій з урахуванням геопросторового розміщення та тематики, що сприятиме оптимізації пропозицій на ринку туристичних послуг, поліпшить стан кон'юнктури туристичного арт-культурного продукту та забезпечить раціональне використання міського простору у туристичному бізнесі.

Цифровізація муралів виступатиме ефективним інструментом підвищення доступності туристичних об'єктів та інтеграції їх у концепцію сучасного SMART-міста. Це сприяє створенню нових можливостей для залучення туристів та розвитку культурного туризму на локальному рівні.

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

У дослідженні не використовувався генеративний штучний інтелект.

Список використаної літератури

1. Schacter R. The World Atlas of Street Art and Graffiti. Aurum Press Ltd. 2023. P. 400. ISBN-13: 9780711283442
2. Золотарчук Н., Феценець Т. Муралі в сучасному українському мистецтві. Традиції та інновації у сучасному дизайні: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції (м. Івано-Франківськ, 25 квітня 2023 року). Івано-Франківськ. Редакційно-видавничий відділ ЗВО «Університет Короля Данила». 2023 С. 36–41. URL: <http://repository.ukd.edu.ua/handle/123456789/1016> (дата звернення 25.02.2026)
3. Different types of murals. URL: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Different_types_of_murals. (дата звернення 15.02.2026)
4. Гаврилаш І. Муралі та графіті в сучасній Україні: особливості та відмінності. *Культура України*. Харків: ХДАК, 2018. Т. 62. С 34–54. <https://doi.org/10.31516/2410-5325.062.23>

5. Joy of six: the buildings transformed by 3D hexagon murals. URL: <https://www.theguardian.com/cities/2019/feb/12/joy-of-six-the-buildings-transformed-by-3d-hexagon-murals> (дата звернення 20.01.2026)
6. Яке призначення муралу? URL: <https://www.edenart.com/news/what-is-a-mural> (дата звернення 20.02.2026)
7. Jażdżewska I. Murals as a tourist attraction in a post-industrial city – a case study of Łódź (Poland). *Turyzm/Tourism*. 2017. V. 27. №2. Pp. 45–56. <https://doi.org/10.1515/tour-2017-0012>
8. Skinner J., Jolliffe L. Murals and Tourism. Heritage, Politics and Identity. UK, Bristol: View Publications. 2019. 320 P. ISBN 9780367218942
9. Yiwei R., Hasna M. F. Murals as catalysts for tourism growth in Muar Town: public perceptions and future potential. *International Journal of Art & Design (IJAD)*. 2025. Vol. 9(2) SI-2. P. 81–93. <https://doi.org/10.24191/ijad.v9i2/SI-2.7092>
10. Провотар Н., Олішевська Ю., Мезенцев К., Кравченко К. Вуличне мистецтво у міському просторі: розміщення та сприйняття у містах України. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»*, 2021, Вип. 55. С. 216–231. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-55-16>
11. Романів О., Рибачок О., Савельєва Д. Стріт-арт в туристичному просторі Житомира. *Географія та туризм*. Київ, 2023 С. 41–49. URL: http://www.geolgt.com.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=289&Itemid=221&lang=uk (дата звернення 20.03.2026)
12. Бітаєва Г. Мистецтво муралу як динамічне художнє явище сучасного українського соціуму. *Науковий журнал Художня культура. Актуальні проблеми*. 2022. Вип.18. № 1. С. 79–86. [https://doi.org/10.31500/1992-5514.18\(1\).2022.260428](https://doi.org/10.31500/1992-5514.18(1).2022.260428)
13. Батенко А. Мурал-арт як складова культурного простору міста. *Українські культурологічні студії*. 2020. Вип. 2. № 7. С. 65–68. [https://doi.org/10.17721/UCS.2020.2\(7\).11](https://doi.org/10.17721/UCS.2020.2(7).11)
14. Гаврилюк Б. Український мурал-арт у контексті світового мистецтва. *Вісник Львівської національної академії мистецтв*, 2018. Вип. 37. С. 241–254. URL: <https://visnyk.lnam.edu.ua/visnyk/2018/37/82aa4b0af34c2313a562076992e50aa3> (дата звернення 05.03.2026)
15. Гаврилаш І. Мурал-арт у контексті масової культури ХХІ століття. *Питання культурології*. 2018. Вип. 34. С. 133–142. <https://doi.org/10.31866/2410-1311.34.2018.154059>
16. Худякова А. Антивоєнні мурали в Україні та світі під час російсько-української війни. *HUDPROM: Журнал українського мистецтва та дизайну*. 2023. Вип. 25. № 1. С. 193–205. <https://doi.org/10.33625/hudprom2023.01.193>

Отримано: 25.03.2026 / Переглянуто: 27.04.2026 / Прийнято: 04.05.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

L.V. KOVALSKA, PhD (Geography),
Associate Professor of the Department of Tourism Studies and Local History
e-mail: lesia.kovalska@cnu.edu.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7582-8249>
Vasyl Stefanyk Precarpathian National University,
201B Halytska Str., Faculty of Tourism, Ivano-Frankivsk, 76000, Ukraine

O. H. PARKHOMENKO, PhD (Geography),
Associate Professor of the Department of Ecology, Geography and Nature Management;
e-mail: sasho1979turizm@ukr.net ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7939-9576>
T.H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium",
53 Hetmana Polubotka Str., Chernihiv, 14013, Ukraine

M. M. LUTSIV,
Master's Degree Holder
e-mail: mariia.lutsiv.21@pnu.edu.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-3802-6352>
Vasyl Stefanyk Precarpathian National University,
201B Halytska Str., Faculty of Tourism, Ivano-Frankivsk, 76000, Ukraine

MURALS AS AN ELEMENT OF URBAN ART AND A FACTOR IN THE DEVELOPMENT OF URBAN TOURISM (A CASE STUDY OF THE CITY OF IVANO-FRANKIVSK)

Purpose. To provide a comprehensive analysis of murals in the city of Ivano-Frankivsk as components of the urban cultural space and objects of tourist attractiveness.

Methods. Analysis and synthesis, systematization and classification, cartographic analysis, descriptive method.

Results. The conclusions highlight that murals in Ivano-Frankivsk constitute a significant element of the urban cultural landscape and a promising resource for the development of cultural and educational tourism. The study include an analysis of the geospatial distribution and thematic content of murals in Ivano-Frankivsk, as well as the development of an urban art tourist route. It has been established that a distinctive feature of murals as a tourism product is their dynamic nature, characterized by continuous renewal through the emergence of new artworks. The study emphasizes that an important aspect of promoting the tourism product "Murals of Prykarpattia" is raising awareness among local residents about this art form and its culture, alongside the dissemination of an ethical code among amateur artists (muralists). A key constraint identified in the promotion of this art-cultural product within the tourism market is the lack of professionally trained guides specializing in muralism.

Conclusions. Their geospatial configuration creates favorable conditions for their integration into the city's tourism infrastructure as attractive cultural sites. The combination of murals with other cultural and historical locations enables the creation of innovative tour programs, contributing to the diversification of the tourism product.

KEYWORDS: mural, tourist route, Ivano-Frankivsk, art-cultural product, muralism tour guide

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this manuscript. In addition, the authors have fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and duplicate publication.

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

AI Statement

In this study, generative artificial intelligence was not used.

References

1. Schacter, R. (2023). *The World Atlas of Street Art and Graffiti*. Aurum Press Ltd, 400 p. ISBN 9780711283442.
2. Zolotarchuk, N., Fetsenets, T. (2023). Murals in contemporary Ukrainian art. *Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference: Traditions and Innovations in Modern Design*, (Ivano-Frankivsk, April 25,

- 2023 pp. 36–41). Ivano-Frankivsk: King Danylo University, Retrieved from <http://repository.ukd.edu.ua/handle/123456789/1016> (in Ukrainian).
3. Different types of murals. Retrieved from https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Different_types_of_murals
 4. Havrylash, I. (2018). Murals and graffiti in contemporary Ukraine: features and differences. *Culture of Ukraine*, 62, 34–54. <https://doi.org/10.31516/2410-5325.062.23> (in Ukrainian).
 5. Joy of six: the buildings transformed by 3D hexagon murals. Retrieved from <https://www.theguardian.com/cities/2019/feb/12/joy-of-six-the-buildings-transformed-by-3d-hexagon-murals>
 6. What is the purpose of a mural? Retrieved from <https://www.edenart.com/news/what-is-a-mural>
 7. Jazdzewska, I. (2017). Murals as a tourist attraction in a post-industrial city: a case study of Łódź (Poland). *Turyzm/Tourism*. 27(2), 45–56. <https://doi.org/10.1515/tour-2017-0012> (in Ukrainian).
 8. Skinner, J., & Jolliffe, L. (2019). *Murals and Tourism: Heritage, Politics and Identity*. Bristol, UK: View Publications. ISBN 9780367218942.
 9. Yiwei, R., & Hasna, M. F. (2025). Murals as catalysts for tourism growth in Muar Town: public perceptions and future potential. *International Journal of Art & Design (IJAD)*. 9(2), SI-2, 81–93. <https://doi.org/10.24191/ijad.v9i2/SI-2.7092>
 10. Provotar, N., Olishevskaya, Yu., Mezentsev, K., & Kravchenko, K. (2021). Street art in urban space: placement and perception in Ukrainian cities. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*, (55), 216–231. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-55-16>
 11. Romaniv, O., Rybachok, O., & Savelieva, D. (2023). Street art in the tourist space of Zhytomyr. *Geography and Tourism*. Kyiv, 41–49. Retrieved from http://www.geolgt.com.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=289&Itemid=221&lang=uk (in Ukrainian).
 12. Bitaieva, H. (2022). Mural Art as a Dynamic Art Phenomenon of Contemporary Ukrainian Society. *Scientific Journal Artistic Culture. Topical Issues*, (18(1)), 79–86. [https://doi.org/10.31500/1992-5514.18\(1\).2022.260428](https://doi.org/10.31500/1992-5514.18(1).2022.260428) (in Ukrainian).
 13. Batenko, A. (2020). Mural-art as a component of the city's cultural space. *Ukrainian Cultural Studies*, 2(7), 65–68. [https://doi.org/10.17721/UCS.2020.2\(7\).11](https://doi.org/10.17721/UCS.2020.2(7).11) (in Ukrainian).
 14. Havryliuk, B. (2018). Ukrainian mural art in the context of world art. *Bulletin of Lviv National Academy of Arts*, (37), 241–254. Retrieved from <https://visnyk.lnam.edu.ua/visnyk/2018/37/82aa4b0af34c2313a562076992e50aa3> (in Ukrainian).
 15. Havrylash, I. (2018). Mural art in the context of XXI century mass culture. *Questions of Cultural Studies*, (34), 133–142. <https://doi.org/10.31866/2410-1311.34.2018.154059> (in Ukrainian).
 16. Khudyakova, A. (2023). Anti-war murals in Ukraine and worldwide during the russian-ukrainian war. *HUDPROM: Journal of Ukrainian Art and Design*, 25(1), 193–205. <https://doi.org/10.33625/hudprom2023.01.193> (in Ukrainian).

Submission received: 25.03.2026 / Revised: 27.04.2026 / Accepted: 04.05.2026 / Published: 30.05.2026

<https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-13>

UDC: 338.49: 656.2: 504.5

L. A. HOROSHKOVA, DSc (Economy), Prof.,

Professor of the Department of Ecology

e-mail: goroshkova69@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7142-4308>

National university of "Kyiv-Mohyla academy"

2, Skovorody, Str., Kyiv, 04070, Ukraine

O. I. MENSHOV, DSc (Geology),

Senior Researcher of the Department of Geoinformatics

e-mail: menshov@knu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7280-8453>

Taras Shevchenko National University of Kyiv

60, Volodymyrska Str., Kyiv, 01033, Ukraine

D. V. MASLOV,

PhD Student of the Department of Ecology

e-mail: 20denismaslov@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-7397-8329>

National university of "Kyiv-Mohyla academy"

2, Skovorody, Str., Kyiv 04070, Ukraine

ASSESSMENT OF MILITARY IMPACTS ON PROTECTED AREAS OF UKRAINE USING SENTINEL-1 AND MACHINE LEARNING

Purpose. To assess military impacts on protected areas of Ukraine using Sentinel-1 Radar Vegetation Index (RVI) data and machine learning methods in order to identify spatial and temporal patterns of vegetation disturbance and ecosystem transformation under wartime conditions

Methods. Spatial and temporal changes are analyzed using remote sensing techniques combined with machine learning methods, including unsupervised classification algorithms to detect patterns of vegetation disturbance and ecosystem transformation. Additionally, comparative analysis and time-series analysis are applied to assess the impact of military activities on forest ecosystems under wartime conditions.

Results. This study assesses the impact of military activity on forest ecosystems in eastern Ukraine using Sentinel-1 SAR data, the Radar Vegetation Index (RVI), baseline-relative change analysis, and unsupervised machine learning. The primary objective was to detect, quantify, and characterize war-related forest disturbance in the Serebrianskyi Botanical Reserve which is directly exposed to active military operations and to understand the extent, severity, and temporal dynamics of that damage relative to a pre-conflict baseline. A conflict-free control site, Homilsha Forests National Nature Park, was used to distinguish military-driven change from background ecological variability. The study addresses whether Sentinel-1 RVI, VV, and VH backscatter can capture the spatial patterns and progressive development of military-induced forest disturbance over the period 2020–2025. Sentinel-1 data were processed in Google Earth Engine and restricted to forest pixels using a land-cover mask. Annual summer composites were generated for each year, and a pre-conflict baseline (2020–2021) was used to quantify post-disturbance change. The analysis encompassed annual RVI trend assessment, rule-based damage classification, K-means clustering, and detection of isolated forest anomalies. After 2022, Serebrianskyi ROI showed a marked RVI decline from stable values in 2020–2022, with changed forest pixels in 2025, including severely disturbed pixels increasing. Homilsha ROI remained stable, and no deterioration trend. Machine-learning results were consistent.

Conclusions. SAR methods have proven to be effective for remote monitoring with limited field access, although derived categories of damage should be interpreted as remote sensing indicators and not as field validated categories of damage.

KEYWORDS: *Sentinel-1, SAR, Radar Vegetation Index, Forest disturbance, affected forests, Remote sensing, Machine learning*

Як цитувати: Horoshkova L.A., Menshov O. I., Maslov D. V. Assessment of military impacts on protected areas of Ukraine using Sentinel-1 and machine learning. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2026. Вип. 45. С. 163-187. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-13>

In cites: Horoshkova, L.A., Menshov, O. I., & Maslov D. V. (2026). Assessment of military impacts on protected areas of Ukraine using Sentinel-1 and machine learning. *Man and Environment. Issues of Neoecology*, (43), 163-187. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-13>

Introduction

The full-scale military aggression against Ukraine has caused unprecedented environmental damage, particularly within protected natural areas that play a crucial role in preserving biodiversity, maintaining ecosystem stability, and supporting ecological security. Military operations, including shelling, explosions, fires, fortification construction, and the movement of heavy military equipment, have significantly transformed natural landscapes and accelerated ecosystem degradation. Forest ecosystems located within protected areas are especially vulnerable to such disturbances due to their sensitivity to physical destruction, pyrogenic impacts, and long-term changes in vegetation structure [1, 2].

Armed conflict is increasingly recognized as a major cause of environmental degradation, forest degradation, biodiversity loss and land cover change. The environmental impacts of war are both direct and indirect. Direct impacts include shelling, explosions, fire, bombing, movement of military vehicles, trench construction, fortification construction and deliberate destruction of vegetation. Indirect impacts include illegal logging, resource extraction driven by displacement, reduced forest management, weakened conservation enforcement, limited access to monitoring and loss of forest management capacity [3-5] defines the field as the ecology of war, and stresses that war should be understood not only as a political or humanitarian crisis, but also as a process of environmental degradation. This aspect is particularly important in forested conflict zones where repeated disturbance can change the structure of vegetation, soil characteristics, etc.

Military activity may affect forest ecosystems through a number of interacting pathways. Explosions and artillery fire can break the stems, damage the crowns, create craters, ignite the fires, and expose the bare ground. Heavy military vehicles can compact the soil, disturb the roots, damage the undergrowth and create trails that fragment the forest habitat. Trenching, building

of roads and fortification may further alter the microtopography, drainage and continuity of forests. In addition, limited access during conflict can hinder firefighting, pest control, sanitary logging, biodiversity monitoring and restoration activities [4, 6]. These processes can result in canopy degradation, biomass loss, fire scars, soil disturbance, fragmentation, pollution and long-term loss of environmental resilience.

The link between armed conflict and forests is complex, as war can have a wide range of environmental impacts depending on the intensity of the conflict, governance conditions, displacement of populations and the demand for resources. McNeely (2003) describes how forest biodiversity is directly affected by the destruction of habitats and indirectly by institutional collapse or increased exploitation. Gaynor, et al. [7] goes on to explain that armed conflict can have multiple impacts on conservation, such as mortality of wildlife, loss of habitats, displacement and changes in human pressure. Armed conflicts may lead to rapid forest loss through logging, mining, fires and military damage, or they may restrict certain uses by trade or access restrictions [8]. Conflict-related changes in forests should therefore be assessed with regard to local ecological conditions, the basic vegetation structure, the exposure to conflict and the comparison areas.

Comparative evidence from other conflicts shows different environmental damage caused by war. During the Vietnam War, forests were severely damaged by chemical pollution, bombing, fire, and long-term contamination, making Vietnam one of the most notorious examples of environmental degradation caused by military action [3, 6]. In Syria, war-related deforestation is associated with fuel wood extraction, displacement, administrative collapse and displacement through direct famines, Daiyoub et al. [9] using remote sensing and machine learning to detect conflict forest extinctions from 2010 to 2019. In the Democratic Republic of Congo, Butsic et al. [10] found that warfare, mining, and protected areas interacted to shape deforestation patterns. In Rwanda, Ordway [8] has shown that

post-conflict forest outcomes can be politically and institutionally complex, with changes in forests shaped by both conflict-induced destruction and post-conflict conservation policies. These examples show that the environmental damage caused by conflict may include canopy loss, deforestation, loss of biodiversity, soil degradation, pollution, altered fire regimes, fragmentation of habitats and weakened environmental governance. Remote sensing has become a central tool for assessing environmental damage in war-affected regions because field surveys are often unsafe, delayed, or impossible. Kaplan et al. [11] reviewed the usage of remote sensing for environmental protection in war situations and demonstrated that satellite data can be used to support the assessment of forest loss, fire, soil degradation, oil pollution, damage to infrastructure and damage to agriculture. Shevchuk et al. [12] used remote sensing data to investigate environmental consequences of the Russia–Ukraine war and emphasized the importance of satellite monitoring where field access is limited. More generally, remote conflict monitoring is becoming more widespread as high-resolution satellite imagery, dense time series data and machine learning technologies become more available [13]. Remote sensing is therefore valuable not only for detecting physical damage, but also for producing replicable evidence that can be compared with comparable evidence from other times and other places.

Optical sensors such as Landsat and Sentinel-2 are widely used to monitor vegetation loss, burn scars, changes in soil cover and the decline of forests. However, optical images are limited by cloud cover, smoke, seasonal lighting and atmospheric conditions. Synthetic aperture radar (SAR), in particular Sentinel-1, is an important addition as it can receive data without interference from daylight and is less affected by cloud cover. The SAR backscatter is sensitive to the structure of vegetation, humidity, surface roughness and geometry of the canopy, which makes it suitable for monitoring forests under challenging observation conditions [14–17]. This makes Sentinel-1 particularly useful in conflict-affected areas where it is necessary to monitor continuously and where optical images may be incomplete.

The vegetation index of the radar scan is commonly used to summarize the vegetation scatter. In the Sentinel-1 dual-polarization data, VH backscattering is generally related to volume

scattering from vegetation canopy, whereas VV backscattering is more affected by surface scattering and double-spreading effects. The RVI combines these signals to represent the density of vegetation, the structure of the canopy and the characteristics related to biomass. Mandal et al. [14] demonstrated the value of the dual polarimetric RVI for vegetation monitoring by using Sentinel-1 SAR data. Vreugdenhil et al. [16] explored the relationship between the Sentinel-1 ratio metrics and optical depth of vegetation in Europe. These studies support the use of vegetation indices derived from the SAR for the detection of changes in vegetation structure where optical data alone may not be sufficient.

In forest ecosystems, SAR-based monitoring is particularly useful because structural disturbance may occur before complete land-cover conversion. Forest degradation may involve partial canopy loss, branch breakage, reduced understory complexity, soil exposure, or burn effects without immediate conversion to non-forest land cover. Optical vegetation indices can detect greenness and photosynthetic activity, but SAR can add information on canopy structure, moisture, and surface conditions. Studies combining SAR and optical time series have shown that multi-source approaches improve disturbance mapping and forest monitoring, particularly in heterogeneous landscapes [18–20]. For conflict-affected forests, this is important because war-related disturbance may be spatially irregular, temporally abrupt, and structurally complex.

Machine learning has also become increasingly important in forest monitoring and conflict-related environmental assessment. In many conflict zones, field reference data are limited or unavailable, making unsupervised, weakly supervised, or semi-supervised approaches useful. Clustering methods can identify groups of pixels with similar temporal or structural characteristics, while anomaly detection can highlight observations that depart from expected behavior. Daiyoub et al. [9] used remote sensing and machine learning to assess war-induced deforestation in Syria, and Gatti et al. [21] applied machine learning to detect forest loss in Ukraine during the war. More generally, machine-learning approaches have been widely used with Sentinel-1 and Sentinel-2 data for land-cover mapping, biomass estimation, disturbance detection, and forest monitoring [18, 22, 23].

For conflict-affected forests, an integrated approach combining SAR indices, temporal baselines, control areas, and machine-learning classification is methodologically valuable. Baseline comparison helps distinguish disturbance from normal seasonal variability, while control areas provide a reference for regional environmental variation. Machine learning can support classification of forest condition where field labels are limited. However, remote-sensing-derived damage classes should be interpreted as indicators of structural disturbance rather than direct field-confirmed damage categories. SAR signals can be influenced by canopy structure, moisture, surface roughness, burn effects, and acquisition geometry. Therefore, the strongest interpretation comes from convergence among multiple indicators, such as temporal change, spatial pattern, SAR backscatter, vegetation indices, and contextual evidence of conflict exposure.

In the context of conflict-related ecological assessment, the major expected damage types

from military activity include canopy degradation, tree mortality, burned vegetation, fragmentation, soil compaction, crater formation, trench disturbance, altered hydrology, contamination, and restricted forest recovery.

Compared with cases such as Vietnam, Syria, the Democratic Republic of Congo, and Rwanda, forest disturbance in Ukraine should be understood within a combined framework of direct military pressure, protected-area vulnerability, remote-sensing detectability, and limited field access.

The use of Sentinel-1 RVI and machine-learning methods therefore contributes to a growing body of research that uses Earth observation to assess ecological damage in conflict-affected regions. In relation to the present article, this literature supports the methodological use of Sentinel-1 SAR, RVI, baseline-relative change analysis, and unsupervised machine learning for forest disturbance assessment in areas where military activity limits direct ecological fieldwork.

Objects and Research Methods

Study Area. This study focuses on two forest regions defined as areas of interest (AOIs) in eastern Ukraine (fig. 1) representing different levels of exposure to disturbance associated with military activity. The first AOI corresponds to the Serebrianskyi Botanical Reserve, located within the Kreminna forest massif in Luhansk region. The reserve is situated approximately 8 km southwest of the city of Kreminna, within the Kreminna district, and encompasses forest compartments 110–113 and 131 of the Serebrianka forestry of the State Enterprise “Kreminna Forestry and Hunting Range”. This AOI is located in close proximity to the active frontline and has been directly affected by warfare, military operations, and associated disturbances since 2022. The second AOI is located within Homilsha Forests National Nature Park in Kharkiv region and lies at a greater distance from the frontline, with comparatively lower exposure to direct military activity during the same period. The spatial configuration of both AOIs and their relative position with respect to the frontline are illustrated in Figure 1, where the Serebrianskyi AOI (Serebrianka forest area) is highlighted in red and the Homilsha AOI is shown in blue.

The Serebrianskyi AOI was defined as a rectangular polygon (38.1125–38.2375°E,

48.96–49.02°N), representing a forested area adjacent to zones of active hostilities. The Homilsha AOI was delineated as a polygon derived from a 2.5 km buffer around a central coordinate (36.2796°E, 49.5939°N), capturing a forest area spatially separated from the main conflict zone. To ensure consistency in land cover conditions for remote sensing analysis, both AOIs were restricted to forested pixels using the ESA WorldCover 2020 dataset (forest class = 10). A spatial connectivity filter (minimum of 8 connected pixels) was further applied to exclude isolated or potentially misclassified pixels, thereby retaining only contiguous forest patches suitable for analysis. These preprocessing steps ensure that subsequent analysis is limited to structurally consistent forest areas.

Syntaxonomic Composition and Structural Characteristics of Forest Vegetation in the Study Areas. The Serebrianskyi Botanical Reserve (Kreminna forest massif) is characterized by forest vegetation belonging mainly to the classes Vaccinio-Piceetea (pine forests on sandy substrates) and Quercetea robori-petraeae (oak-dominated forests), including alliances such as Dicrano-Pinion sylvestris and Quercu roboris-Pinion sylvestris. The vegetation is dominated by Pinus sylvestris and Quercus robor, with admixture of Betula pendula, Populus

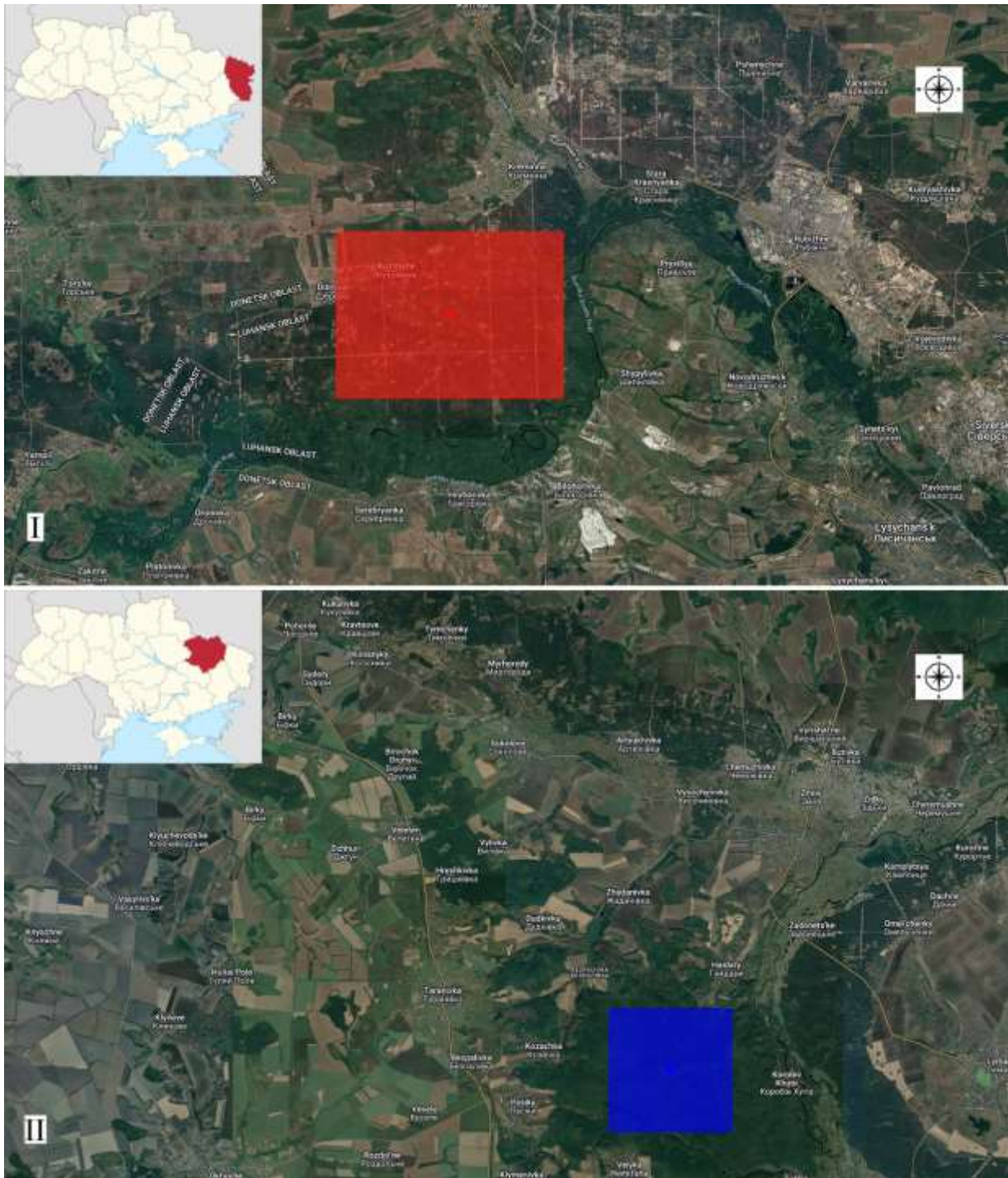


Fig. 1 – Study areas used in the analysis: (top) *Serebrianskiy Botanical Reserve AOI* (Serebrianka forest area, Luhansk region) located near the frontline and exposed to active military operations; (bottom) *Homilsha Forests AOI* (Kharkiv region) shown as a blue polygon, located farther from the frontline with lower exposure to direct military activity

tremula, and occasionally *Acer platanoides*. The ground layer typically includes *Calamagrostis epigejos*, *Festuca ovina*, *Carex ericetorum*, *Convallaria majalis*, and *Polygonatum odoratum*, along with lichens of the genus *Cladonia*

and mosses such as *Pleurozium schreberi* and *Dicranum*. Structurally, these forests are usually two-layered, with a pine-dominated canopy on nutrient-poor sandy soils and a relatively sparse herbaceous layer composed of xerophilous and

forest-steppe species. Lichen and moss cover can be well developed in more open stands, reflecting dry edaphic conditions typical of river terrace ecosystems in the Siverskyi Donets basin.

The Homilsha Forests National Nature Park (Kharkiv region) represents mesophytic broadleaved and mixed forests of the forest-steppe zone, primarily associated with the class Quercetea robori-petraeae and, locally, Vaccinio-Piceetea in pine-dominated areas. The dominant tree species are Quercus robur and Pinus sylvestris, accompanied by Acer platanoides, Tilia cordata, Fraxinus excelsior, and Betula pendula. The herbaceous layer is comparatively species-rich, including Aegopodium podagraria, Stellaria holostea, Carex pilosa, Asarum europaeum, and Convallaria majalis, while the moss layer is less pronounced and composed mainly of mesophytic forest species such as Brachythecium. These forests exhibit a well-developed multi-layered structure with a dense canopy, distinct shrub layer, and diverse understory, reflecting more favorable moisture conditions and higher ecological stability compared to the Serebrianskyi AOI.

Satellite Data, Preprocessing, and Radar Vegetation Index. Vegetation monitoring is commonly performed using optical remote sensing data; however, optical observations are limited by cloud cover and illumination conditions. These limitations reduce data availability, especially in regions affected by warfare and military

activity, where continuous monitoring is required. To address this, this study uses Synthetic Aperture Radar (SAR) data from the Copernicus Sentinel-1 mission, which provides observations independent of atmospheric conditions and solar illumination.

Sentinel-1 Ground Range Detected (GRD) products were processed in Google Earth Engine (GEE). Data selection was limited to the Interferometric Wide (IW) acquisition mode with dual polarization (VV and VH), covering the period from January 2020 to December 2025. Both ascending and descending orbit passes were included to increase temporal coverage and reduce acquisition bias.

The two polarizations provide different information about surface and vegetation structure. VV polarization is mainly sensitive to surface scattering and double-bounce effects, while VH polarization is more sensitive to volume scattering within vegetation canopies.

Preprocessing was applied to ensure consistency of the SAR data. Standard Sentinel-1 processing includes orbit file application, thermal noise removal, radiometric calibration, and terrain correction (fig. 2).

After preprocessing, the data were prepared for analysis. The processed images were spatially subset to the defined AOIs. The VV and VH polarization bands were then separated and transformed between linear and decibel representations as required for further processing (fig. 3).

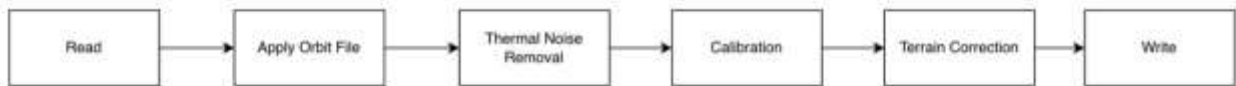


Fig. 2 – Sentinel-1 preprocessing workflow including orbit file application, thermal noise removal, radiometric calibration, and terrain correction

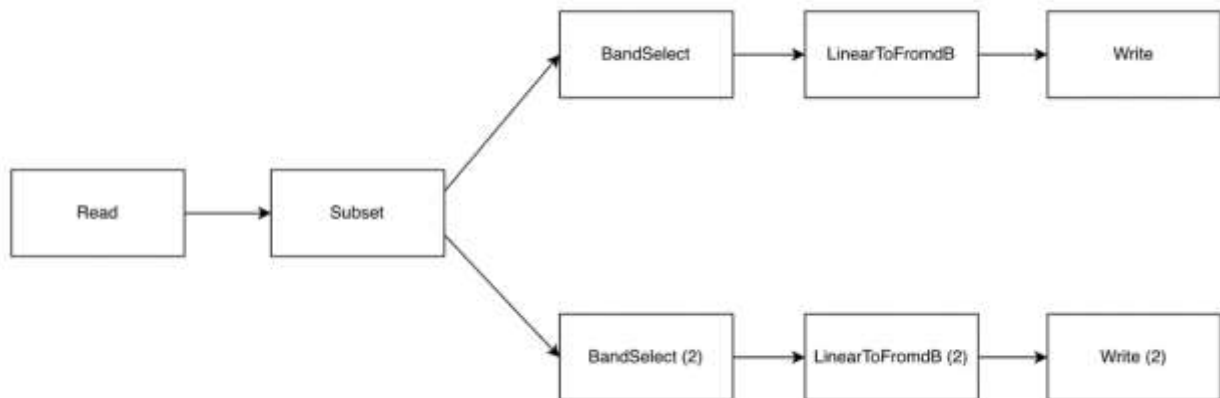


Fig. 3 – Post-processing workflow including spatial subsetting to AOIs, separation of VV and VH bands, and conversion between linear and decibel backscatter values

Vegetation dynamics were quantified using the **Radar Vegetation Index (RVI)**. The RVI was calculated for each Sentinel-1 acquisition as:

$$RVI = \frac{4 \cdot \sigma_{VH}^0}{\sigma_{VV}^0 + \sigma_{VH}^0}$$

where σ_{VV}^0 and σ_{VH}^0 represent the backscatter coefficients in the co-polarized (vertical transmit–vertical receive) and cross-polarized (vertical transmit–horizontal receive) channels, respectively. The RVI exploits the sensitivity of cross-polarized backscatter (VH) to volume scattering within vegetation canopies, while the co-polarized component (VV) is more influenced by surface and double-bounce scattering.

As a result, higher RVI values generally indicate increased vegetation density, structural complexity, and biomass, whereas lower values correspond to sparse vegetation or non-vegetated surfaces. The normalization by the sum of VV and VH reduces the influence of absolute backscatter intensity and improves comparability across different acquisition conditions.

Time-Series Data Processing. To reduce speckle noise and short-term variability inherent in SAR data, seasonal composites were generated using median aggregation for the peak vegetation period (June–August), with additional emphasis on July–August to enhance interannual contrast. For each year, median composites of VV, VH, the Radar Vegetation Index (RVI), and the VH/VV ratio were produced after applying a forest mask to ensure consistency in land cover. A pre-disturbance baseline was subsequently defined as the mean of the 2020–2021 seasonal composites, providing a stable reference against which anomalies and potential disturbance signals could be evaluated.

A multi-temporal feature stack was constructed at the pixel level to capture both structural properties and temporal dynamics of vegetation. This included baseline features (VV, VH, RVI, and VH/VV ratio), post-disturbance metrics for 2024–2025 (mean values and differences relative to baseline such as ΔRVI , ΔVV , and ΔVH), and temporal statistics for 2022–2025 (mean, minimum, maximum, standard deviation, range, and linear trend of RVI). In addition, annual RVI values from 2020 to 2025 were retained as a time series, alongside a contextual binary indicator distinguishing conflict-affected and control regions, enabling

differentiation between disturbance-driven and natural variability.

To ensure computational efficiency while maintaining statistical robustness, a stratified random sampling approach was applied, selecting 12,000 pixels per region at a spatial resolution of 20 m. Sampling was conducted directly on the feature stack while preserving spatial geometry, resulting in a combined dataset of approximately 24,000 forest pixels. Monthly time series of RVI, VV, VH, and the VH/VV ratio were then computed for each region and aggregated over the June–August period to assess seasonal behavior and long-term trends. Annual summary statistics, including mean, median, and upper percentiles (75th and 90th), were also derived, with the optimal reducer selected based on its ability to maximize contrast between disturbed and control areas while minimizing noise.

Integrated Remote Sensing and Machine Learning Pipeline for Forest Disturbance Detection. A structured methodological framework was implemented to detect and classify forest disturbances using SAR-derived indicators. The workflow operates at the pixel level and is based on large-scale sampling of Sentinel-1 data within predefined AOIs. For each region, approximately 12,000 pixels were sampled at 20 m spatial resolution, and a multi-temporal feature dataset was constructed for the period 2020–2025. The analysis focuses on summer months (June–August) to ensure consistency of vegetation conditions and reduce seasonal variability. A baseline period (2020–2021) was defined to represent pre-disturbance conditions, against which subsequent changes were quantified. The workflow integrates SAR preprocessing, feature extraction, temporal analysis, and unsupervised machine learning to derive spatially explicit indicators of forest condition and disturbance.

The analytical workflow presented in Figure 4 follows a structured multi-step pipeline for detecting and classifying forest disturbances using SAR-derived indicators. The process begins with study area definition, where Areas of Interest (AOIs) are delineated and constrained to forest cover. This is followed by data acquisition, where Sentinel-1 SAR imagery (VV and VH polarization) is collected for the period 2020–2025. In the preprocessing stage, the dataset is filtered according to acquisition parameters (date, orbit, polarization), and radiometric and geometric corrections are applied.

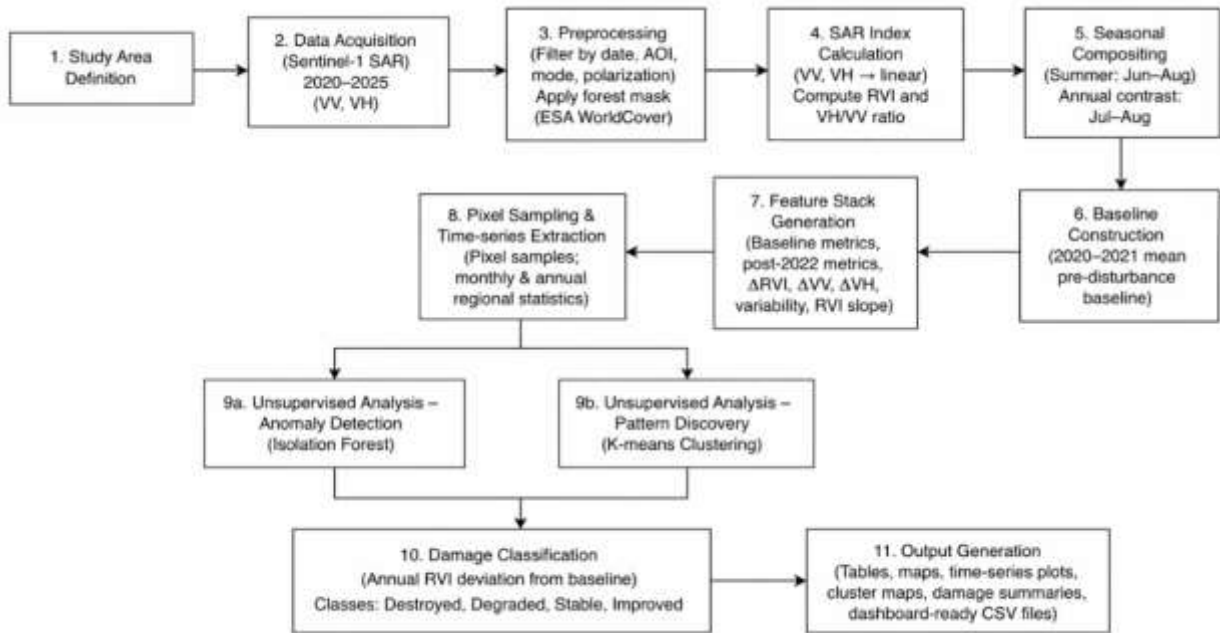


Fig. 4 – SAR-based workflow for forest disturbance detection, including preprocessing, index calculation (RVI, VH/VV), feature generation, unsupervised analysis (K-Means, Isolation Forest), and rule-based classification

After preprocessing, SAR-based indices are computed, including the Radar Vegetation Index (RVI) and the VH/VV ratio, which capture vegetation structure and scattering behavior. These indices form the basis for subsequent temporal analysis. Seasonal compositing is performed to reduce short-term variability and noise. Summer composites (June–August) are used to represent peak vegetation conditions, while inter-annual comparisons focus on consistent seasonal windows. A baseline is then constructed using pre-disturbance observations (2020–2021), providing a reference for detecting deviations in subsequent years. Following baseline definition, a feature stack is generated by combining multiple indicators, including baseline statistics, post-2022 deviations (ΔRVI , ΔVV , ΔVH), temporal trends (e.g., RVI slope), and variability metrics. These features are used as input for pixel-level sampling and time-series extraction, enabling both spatial and temporal analysis. The pipeline then branches into two complementary unsupervised approaches. First, clustering is applied using the K-Means algorithm (clustering module, Scikit-learn) to group pixels into four categories representing different forest condition states. Second, anomaly detection is performed using the Isolation Forest algorithm (ensemble module, Scikit-learn), which identifies pixels exhibiting unusual temporal

behavior relative to the overall dataset. The outputs of these analyses are integrated into a damage classification stage, where a rule-based system assigns each pixel to one of four classes (destroyed, degraded, stable, improved) based on deviations from baseline conditions. Finally, the workflow produces spatial and statistical outputs, including disturbance maps, annual summaries, cluster distributions, and time-series visualizations. The entire pipeline was implemented in Python, using the Google Earth Engine API for large-scale data processing, NumPy and Pandas for data handling, Scikit-learn for machine learning (preprocessing, clustering, anomaly detection), and Matplotlib for visualization.

Unsupervised Analysis and Rule-Based Damage Classification. Unsupervised machine learning was selected due to the absence of reliable ground truth data in conflict-affected regions. This approach enables the identification of intrinsic patterns in the data without predefined labels and is therefore suitable for exploratory analysis of disturbance dynamics. Clustering was performed using the K-Means algorithm (clustering module, Scikit-learn), which partitions the feature space into a predefined number of clusters by minimizing within-cluster variance. The number of clusters was set to four, corresponding to an interpretable gradient

of forest condition ranging from intact to severely disturbed. Multiple initializations ($n = 20$) were used to improve solution stability, and cluster quality was evaluated using the silhouette score. The resulting clusters were interpreted semantically based on their statistical properties, including RVI levels, temporal trends, and variability. Additional interpretation was supported by spatial distribution patterns across AOIs, allowing differentiation between disturbance-related and background variability. In parallel, anomaly detection was conducted using the Isolation Forest algorithm (ensemble module, Scikit-learn). This method identifies observations that are easier to isolate in a random partitioning process, which correspond to rare or unusual patterns in the dataset.

The model was configured with 400 trees and a contamination rate of 12%, producing both anomaly scores and binary labels. This approach is particularly effective for detecting localized or non-systematic disturbances that may

not form distinct clusters. To obtain interpretable outputs, a rule-based classification framework was applied to translate continuous change metrics into discrete disturbance classes. The classification is based on deviations of annual RVI values from the baseline, normalized by the standard deviation (σ) of baseline variability. Thresholds were defined using a combination of pixel-level statistics and regional quantile constraints. Specifically, the standard deviation of baseline RVI was used to account for natural variability, while a 90th percentile floor was applied to avoid unrealistically low thresholds in stable areas.

Each pixel-year observation was classified into one of four categories: destroyed ($\Delta RVI < -2\sigma$), degraded ($-2\sigma \leq \Delta RVI < -\sigma$), stable ($|\Delta RVI| \leq \sigma$), and improved ($\Delta RVI > \sigma$). This formulation ensures that classification reflects both the magnitude of change and the inherent variability of the system, improving robustness across heterogeneous conditions.

Results and Discussion

Changes in Sentinel-1 vegetation signal in the conflict-affected and control forests. As shown in Figure 5, the Sentinel-1 results revealed a clear divergence between the conflict-affected Serebrianskyi Botanical Reserve and the control site in Homilsha Forests National Nature Park. During the pre-disturbance period, corresponding to 2020–2022, both regions exhibited relatively stable seasonal behavior, with no pronounced directional change in the mean summer RVI signal. In Serebrianskyi, RVI values remained high and comparatively consistent during this interval, indicating stable canopy-related scattering conditions. In contrast, the Homilsha control site showed only minor interannual variation and no evidence of marked decline.

After 2023, a different pattern became evident. In the Serebrianskyi site, RVI decreased substantially relative to the pre-disturbance baseline, and this decline continued through 2024–2025. The reduction in RVI was accompanied by a concurrent decrease in both VV and VH backscatter, with a more pronounced decline in the cross-polarized VH component. This pattern is consistent with a reduction in volumetric scattering from forest vegetation and suggests a progressive loss of canopy structure. In contrast, the Homilsha site

remained comparatively stable over the same period, with only limited fluctuations in backscatter and a slight positive shift in RVI relative to the baseline. The annual values supporting this comparison are summarized in Table 1.

Overall, the contrast between the two AOIs indicates that the observed decline in the conflict-affected forest cannot be explained by regional seasonal variability alone. Because both sites were analyzed using the same seasonal window and processing workflow, the divergence between the two forests provides direct evidence of disturbance-related structural change in the Serebrianskyi forest. These results establish the basis for the subsequent spatial and machine learning analyses.

Annual change in RVI relative to the pre-disturbance baseline. The annualized comparison relative to the 2020–2021 baseline provided a clearer measure of divergence between the two study areas. As shown in Figure 6, both AOIs remained close to baseline conditions during 2020–2022, indicating that no substantial departure from the reference period was evident in the early part of the observation record.

From 2023, the annual pattern differed between the two study areas. In the Serebrianskyi Botanical Reserve, RVI changed from

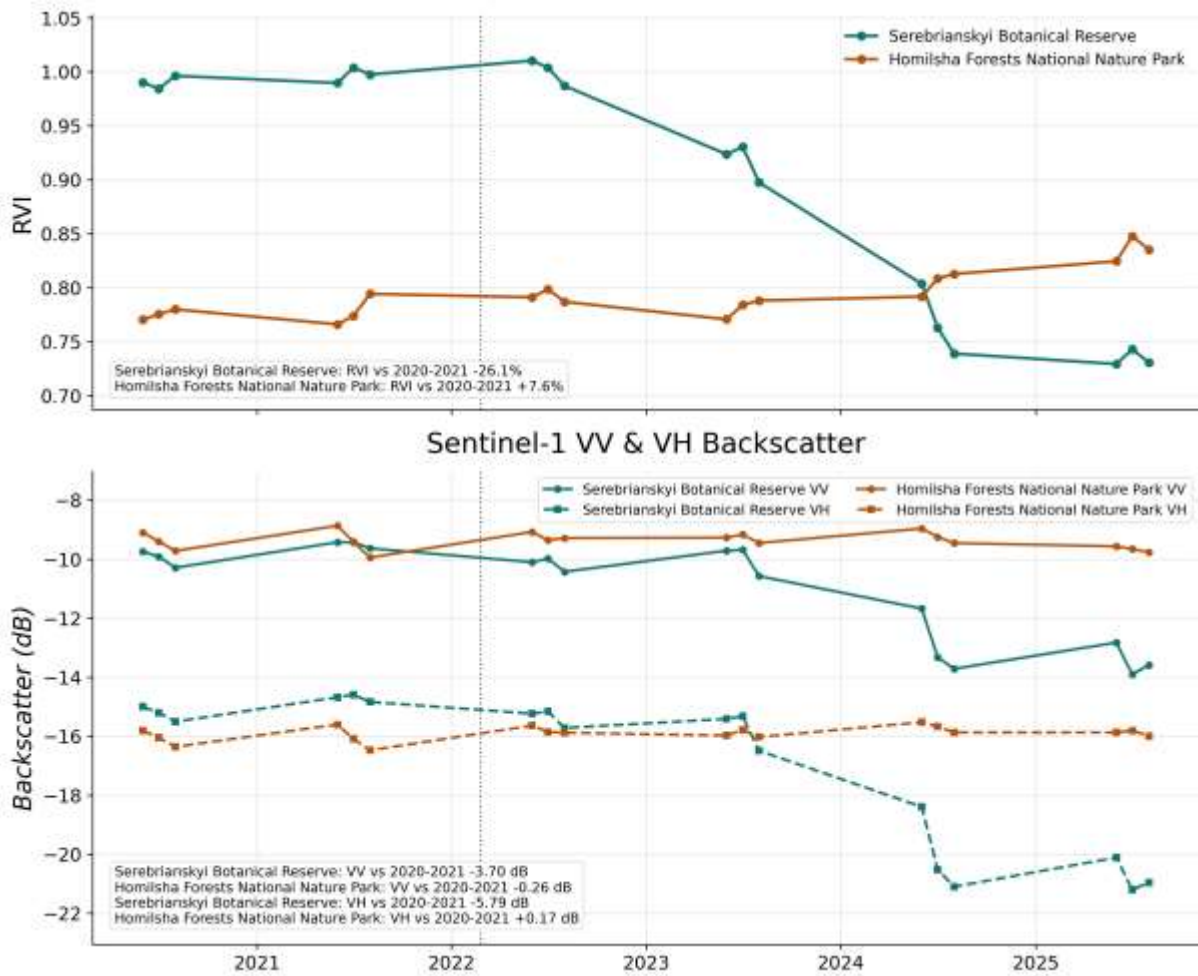


Fig. 5 – Changes in Sentinel-1 Radar Vegetation Index (RVI), VV backscatter, and VH backscatter in the conflict-affected Serebrianskyi Botanical Reserve and the control site in Homilsha Forests National Nature Park during 2020–2025

near-baseline values in 2021–2022 to a negative deviation of about 8.6% in 2023. This decline increased to about 26.6% in 2024 and remained at a similarly low level in 2025, at about 28.7% below the baseline. The largest year-to-year decrease was observed between 2023 and 2024, when the baseline-relative RVI dropped by about 18 percentage points. These results indicate that the main shift in the vegetation signal occurred after 2022 and became substantially stronger in 2024.

In contrast, the Homilsha control site did not show a negative trend. After remaining close to baseline in 2020–2021, it showed a positive deviation of about 2.7% in 2022, a slightly lower but still positive value of about 1.8% in 2023, and further increases to about 5.1% in 2024 and 8.5% in 2025. Thus, while the conflict-affected forest showed a progressive

negative shift, the control forest remained stable and showed a small positive change relative to the baseline.

The difference between the two AOIs increased strongly after 2022. In 2023, the separation between the sites was about 10.4 percentage points. This difference increased to about 31.7 percentage points in 2024 and to about 37.2 percentage points in 2025. Therefore, the annual baseline-relative comparison not only confirms the difference observed in the seasonal time series, but also shows that the divergence between the conflict-affected and control forests became larger through time. Overall, the Serebrianskyi site showed a sustained decrease in RVI relative to the pre-disturbance baseline, whereas the Homilsha site remained stable or slightly positive during the same period.

Table 1

Annual Sentinel-1 summer metrics for the conflict-affected and control forest sites during 2020–2025

Region Name	Year	RVI	VV	VH	Ratio
Serebrianskyi Botanical Reserve	2020	0.93	-10.03	-15.23	0.31
	2021	0.94	-9.46	-14.6	0.31
	2022	0.94	-10.07	-15.22	0.31
	2023	0.86	-10.14	-15.85	0.28
	2024	0.69	-13.45	-20.4	0.21
	2025	0.67	-13.83	-20.83	0.2
Homilsha Forests National Nature Park	2020	0.72	-9.5	-16.09	0.22
	2021	0.73	-9.59	-16.15	0.22
	2022	0.74	-9.28	-15.78	0.23
	2023	0.74	-9.24	-15.8	0.23
	2024	0.76	-9.29	-15.67	0.24
	2025	0.78	-9.64	-15.79	0.24

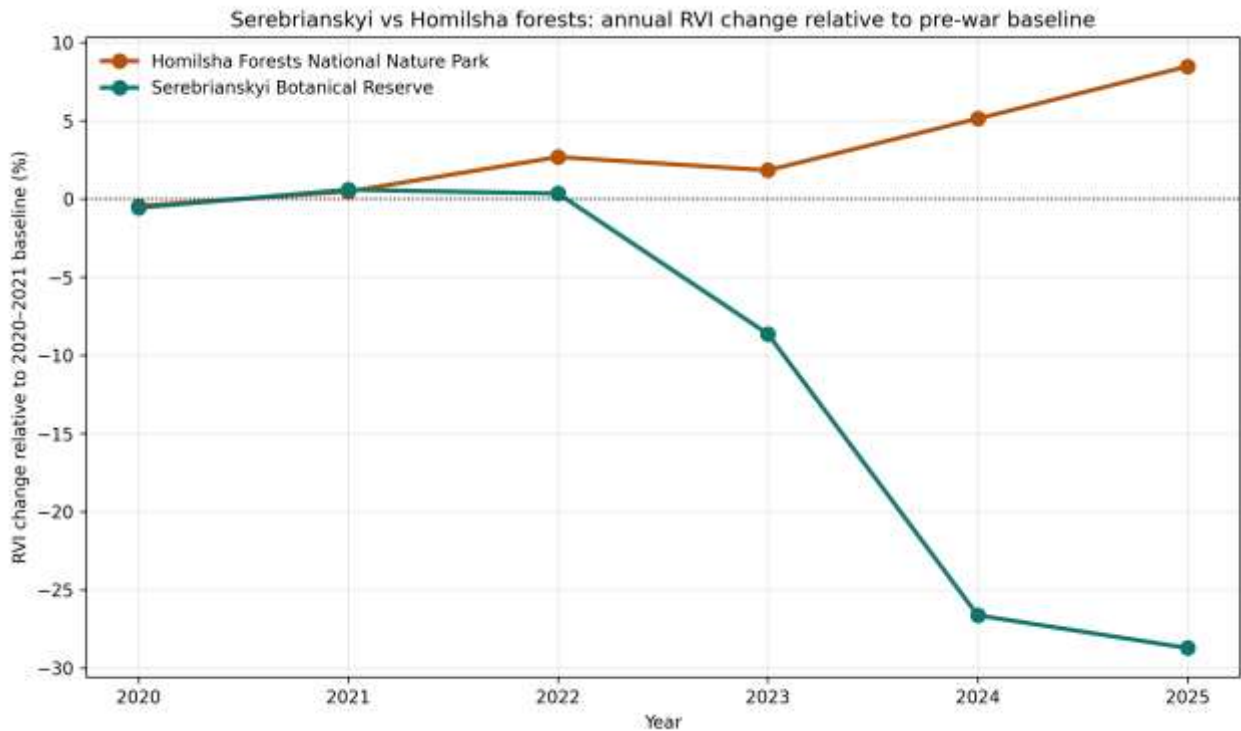


Fig. 6 – Annual change in Radar Vegetation Index (RVI) relative to the 2020–2021 baseline in the conflict-affected Serebrianskyi Botanical Reserve and the control site in Homilsha Forests National Nature Park during 2020–2025

Progressive increase in damaged forest share from 2022 to 2025. The damage classification results showed no measurable damage signal in either study area in 2020–2021. As shown in Figure 7, the share of changed forest pixels, defined as the sum of degraded and

destroyed classes, was 0.0% in both regions in both years. In 2022, non-zero values appeared in both sites, with 8.7% changed pixels in the Serebrianskyi Botanical Reserve and 9.4% in the Homilsha control site. However, from 2023 the two study areas showed different patterns.

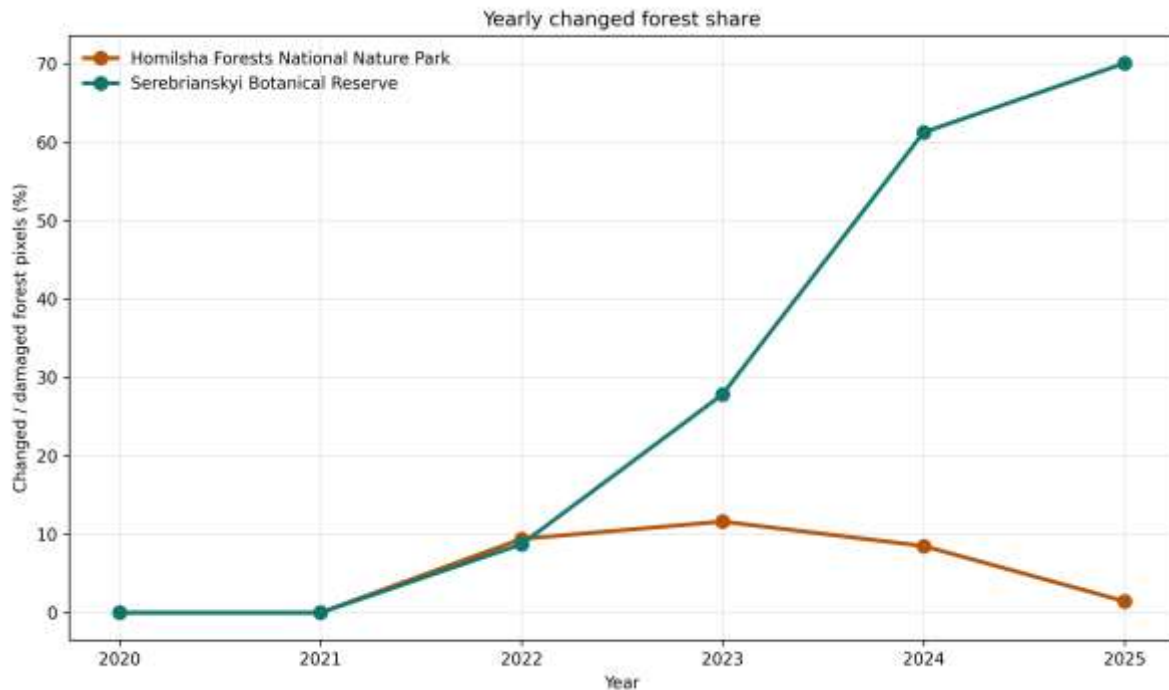


Fig. 7 – Annual share of changed forest pixels (%) in the conflict-affected Serebrianskyi Botanical Reserve and the control site in Homilsha Forests National Nature Park during 2020–2025.

In the Serebrianskyi Botanical Reserve, the share of changed forest increased to 27.9% in 2023, 61.3% in 2024, and 70.1% in 2025. This corresponds to an increase of 19.2 percentage points between 2022 and 2023, followed by a further increase of 33.4 percentage points between 2023 and 2024. The increase from 2024 to 2025 was smaller, at 8.8 percentage points, which indicates persistence of a high damage level after the sharp increase observed in 2024.

A similar pattern was observed for the strongly damaged class. As shown in Figure 8, the share of destroyed forest pixels in the Serebrianskyi Botanical Reserve was 0.0% in 2020–2021, increased to 0.4% in 2022 and 4.9% in 2023, and then rose sharply to 35.7% in 2024 and 42.7% in 2025.

The largest increase occurred between 2023 and 2024, when the destroyed share increased by 30.8 percentage points. This indicates that the rise in total damaged area was associated not only with moderate degradation, but also with a strong increase in the most severe damage class.

The class composition shown in Figure 9 further supports this result. In the Serebrianskyi Botanical Reserve, the stable class decreased from 91.3% in 2022 to 72.2% in 2023, 38.7% in 2024, and 29.9% in 2025. At the same time, the destroyed class increased from 0.4% in 2022 to 4.9% in 2023, 35.7% in 2024, and 42.7% in 2025, while the degraded class increased from

8.3% in 2022 to 23.0% in 2023, 25.6% in 2024, and 27.4% in 2025. These values show a progressive shift from stable forest conditions to damaged classes, with the largest change occurring after 2023.

In contrast, the Homilsha control site did not show the same cumulative increase. The share of changed forest pixels was 9.4% in 2022, 11.6% in 2023, 8.5% in 2024, and 1.4% in 2025. The destroyed class remained low throughout the study period, with values of 0.5%, 0.7%, 0.6%, and 0.0% in 2022–2025, respectively. In the same period, stable and improved classes remained dominant in the control site. Overall, these results show that the decline in the radar vegetation signal in the conflict-affected forest corresponded to a strong increase in damaged forest area, whereas the control site showed only low-level variation without progressive accumulation of damage.

Spatial progression of disturbance across years. The spatial maps showed that the disturbance pattern in the conflict-affected forest was organized in space and changed over time. In 2021, both study areas were assigned almost entirely to the stable/improved class. No degraded or destroyed zones were identified in either AOI, and the spatial pattern was uniform in both forests. This pre-disturbance condition is shown in Figure 10.

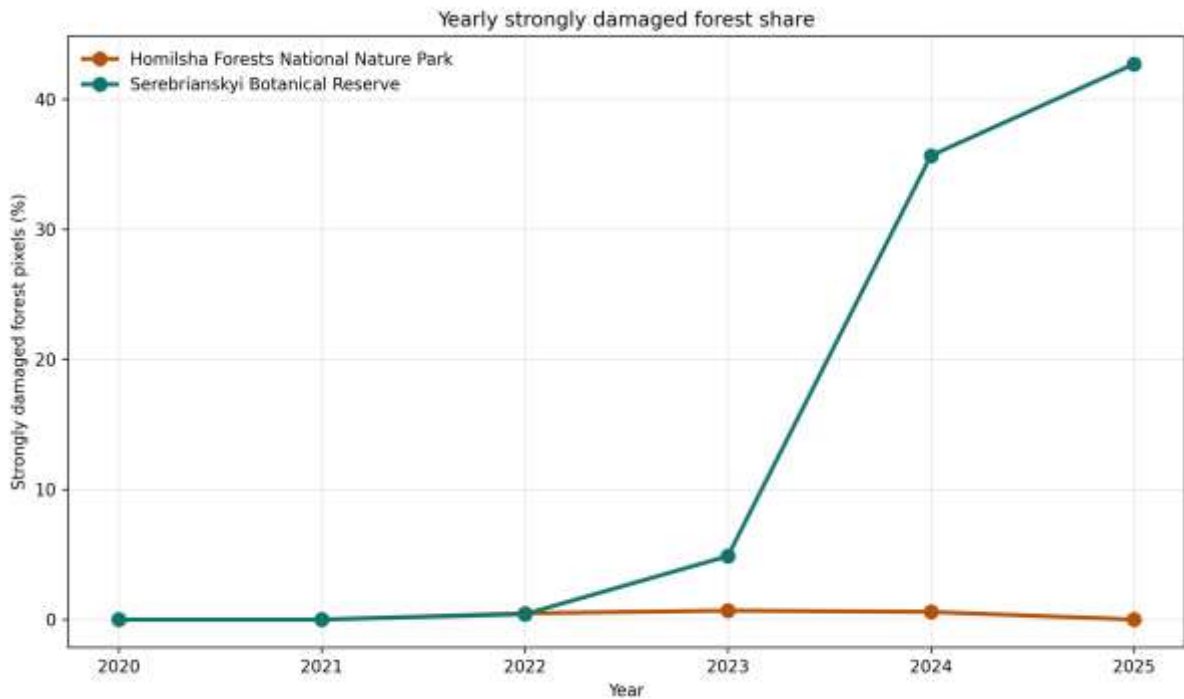


Fig. 8 – Annual share of destroyed forest pixels (%) in the conflict-affected Serebrianskyi Botanical Reserve and the control site in Homilsha Forests National Nature Park during 2020–2025

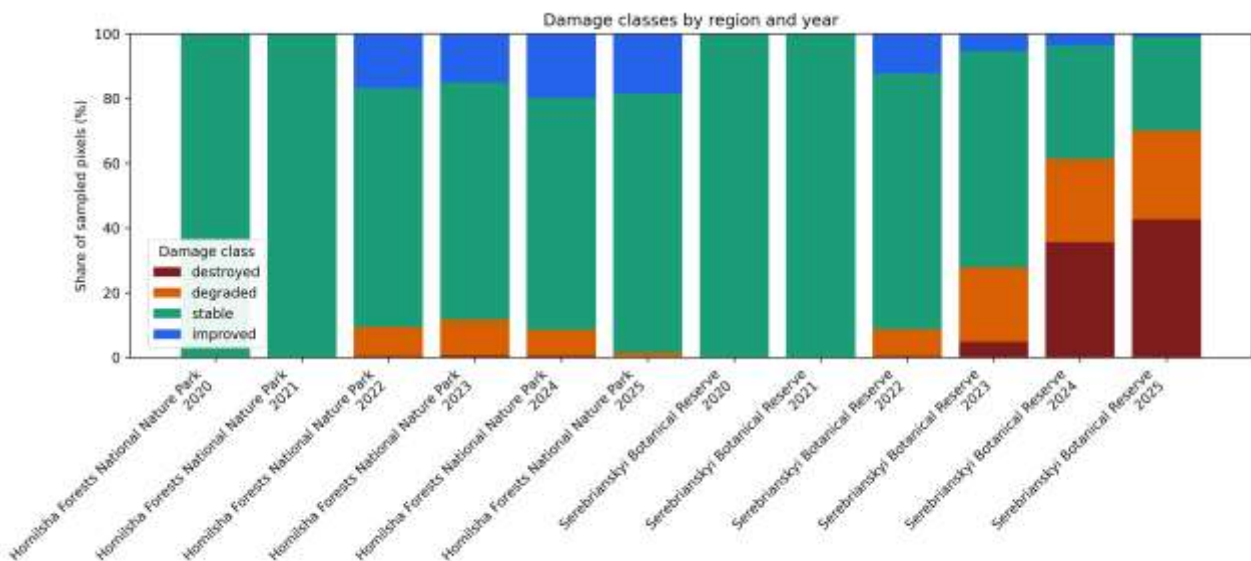
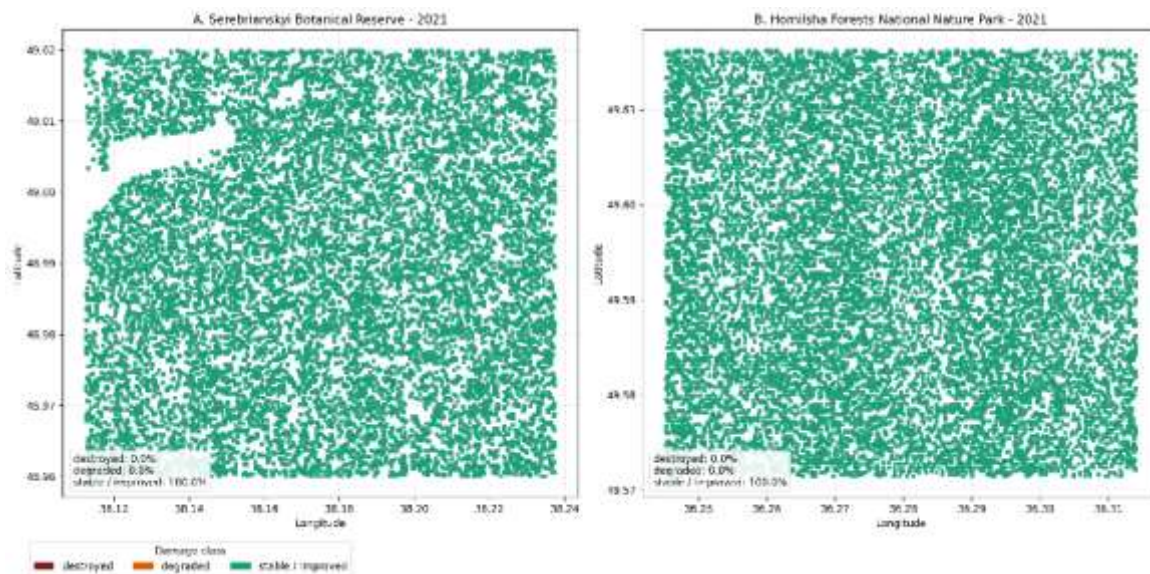


Fig. 9 – Annual distribution of forest damage classes in the conflict-affected Serebrianskyi Botanical Reserve and the control site in Homilsha Forests National Nature Park during 2020–2025



The left panel shows the Serebrianskyi Botanical Reserve, and the right panel shows Homilsha Forests National Nature Park. Colors indicate destroyed, degraded, and stable forest classes

Fig. 10 – Spatial distribution of forest disturbance classes in 2021

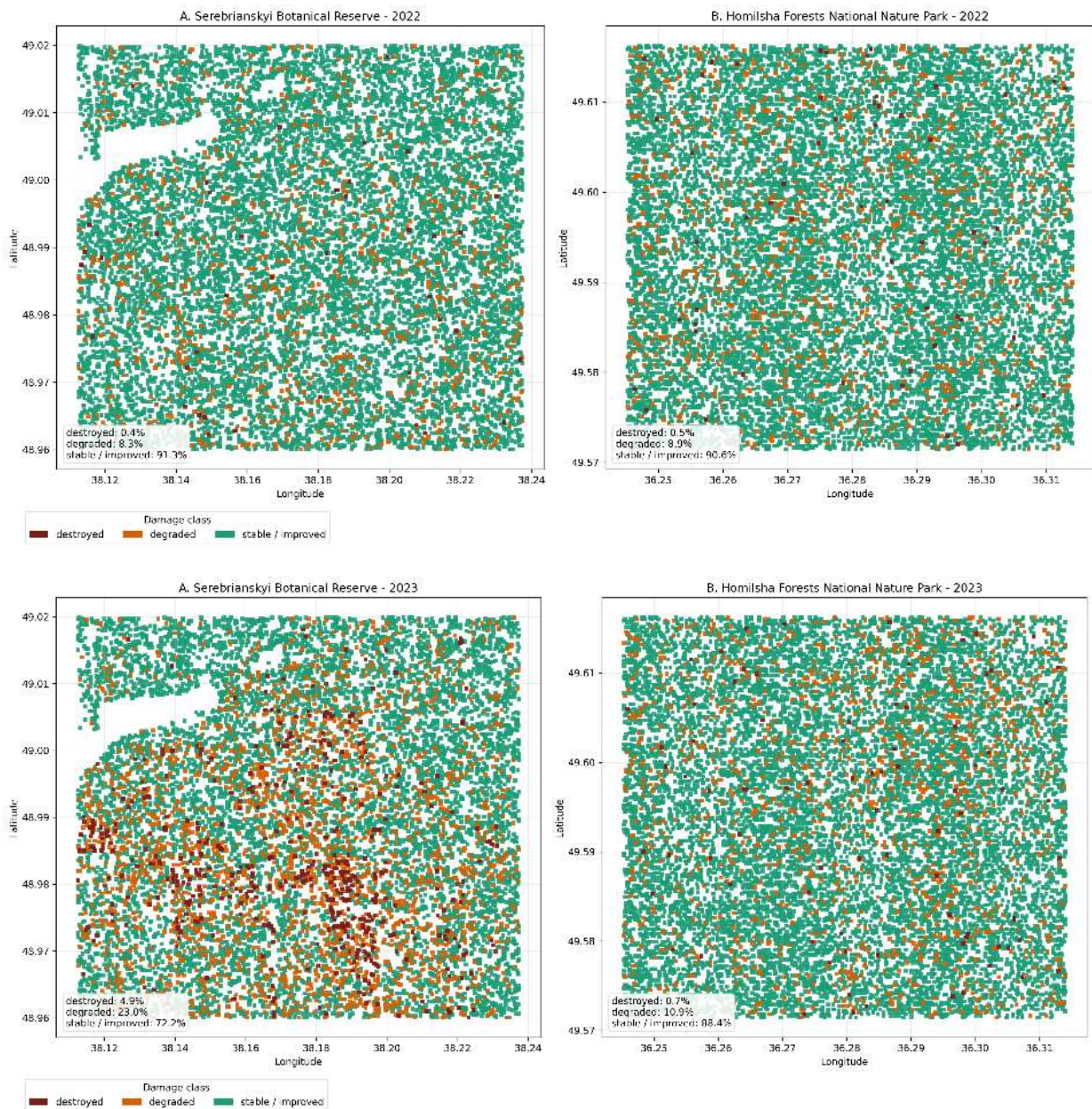
As shown in Figure 10, both forests remained spatially stable during the baseline period. No visible clusters of degraded or destroyed areas were present. This indicates that the disturbance pattern observed in later years was not present in the pre-disturbance period.

A different spatial pattern appeared after 2021. In 2022, disturbed areas were present in both AOIs, but they remained sparse and fragmented. In the Serebrianskyi Botanical Reserve, 8.7% of sampled forest area was classified as disturbed, including 8.3% degraded and 0.4% destroyed area. In the Homilsha control site, the disturbed share was 9.4%, including 8.9% degraded and 0.5% destroyed area. At this stage, disturbed areas in both sites were distributed as isolated points or small patches and did not form broad continuous zones. The spatial development from 2022 to 2025 is shown in Figure 11- 12.

In 2023, the spatial pattern in the Serebrianskyi Botanical Reserve changed substantially. The disturbed share increased to 27.9%, including 23.0% degraded and 4.9% destroyed area, while the share assigned to the stable/improved class decreased to 72.2%. Disturbed areas were no longer limited to isolated locations and began to form broader zones, especially in the central and southern parts of the AOI. In contrast, the Homilsha site remained dominated by the stable/improved class, which accounted for 88.4% of the sampled area. Although 11.6% of the area was classified as disturbed, these disturbed areas

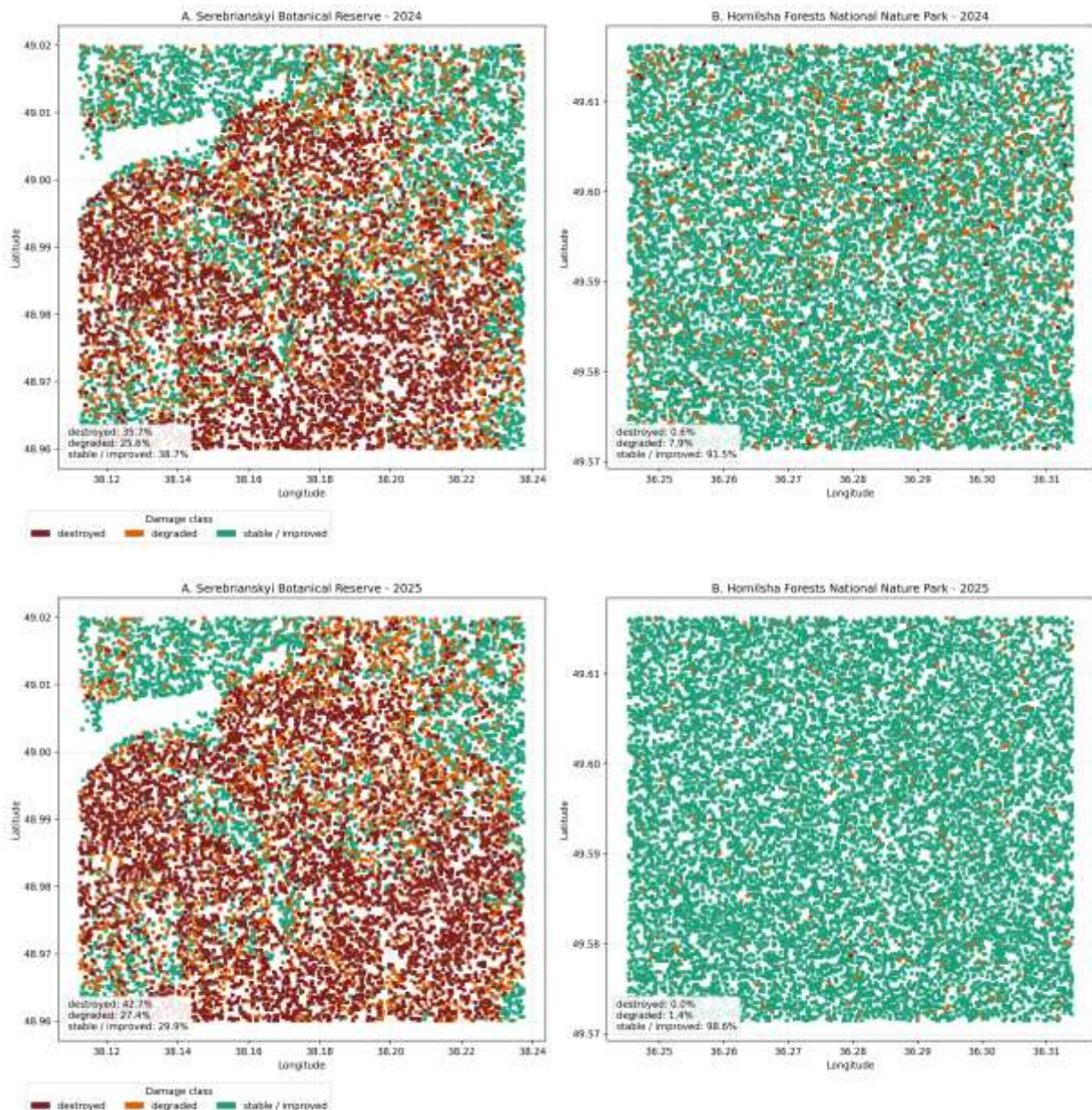
remained spatially dispersed and did not form large connected zones.

In 2024, the spatial expansion of disturbance in the Serebrianskyi Botanical Reserve became much stronger. The disturbed share reached 61.3%, including 25.6% degraded and 35.7% destroyed area, while the share assigned to the stable/improved class decreased to 38.7%. Large connected damaged zones became visible across a substantial part of the AOI. The spatial pattern changed from fragmented patches to broad continuous areas. In the Homilsha control site, the spatial pattern remained different. The stable/improved class accounted for 91.5% of the sampled area, while disturbed classes represented 8.5%, including 7.9% degraded and 0.6% destroyed area. These disturbed areas remained small and scattered. In 2025, the spatial disturbance pattern in the Serebrianskyi Botanical Reserve intensified further. The disturbed share increased to 70.1%, including 27.4% degraded and 42.7% destroyed area, while the stable/improved class decreased to 29.9%. The destroyed class became the dominant disturbed category and occupied extensive connected zones across much of the AOI. Compared with 2023 and 2024, the 2025 pattern shows both further expansion and stronger spatial continuity of severe damage. In contrast, the Homilsha site remained almost entirely assigned to the stable/improved class. In 2025, 98.6% of the sampled area belonged to this class, 1.4% was classified as degraded, and no destroyed area was identified. The few disturbed



The left column shows the Serebrianskyi Botanical Reserve, and the right column shows Homilsha Forests National Nature Park.

From top to bottom, the rows correspond to 2024 and 2025. Colors indicate destroyed, degraded, and stable/improved forest classes
Fig. 11 – Spatial distribution of forest disturbance classes in 2022–2023



The left column shows the Serebrianykyi Botanical Reserve, and the right column shows Homilsha Forests National Nature Park. From top to bottom, the rows correspond to 2024 and 2025. Colors indicate destroyed, degraded, and stable/improved forest classes.

Fig. 12 - Spatial distribution of forest disturbance classes in 2024–2025

areas that remained were isolated and did not indicate broad spatial change.

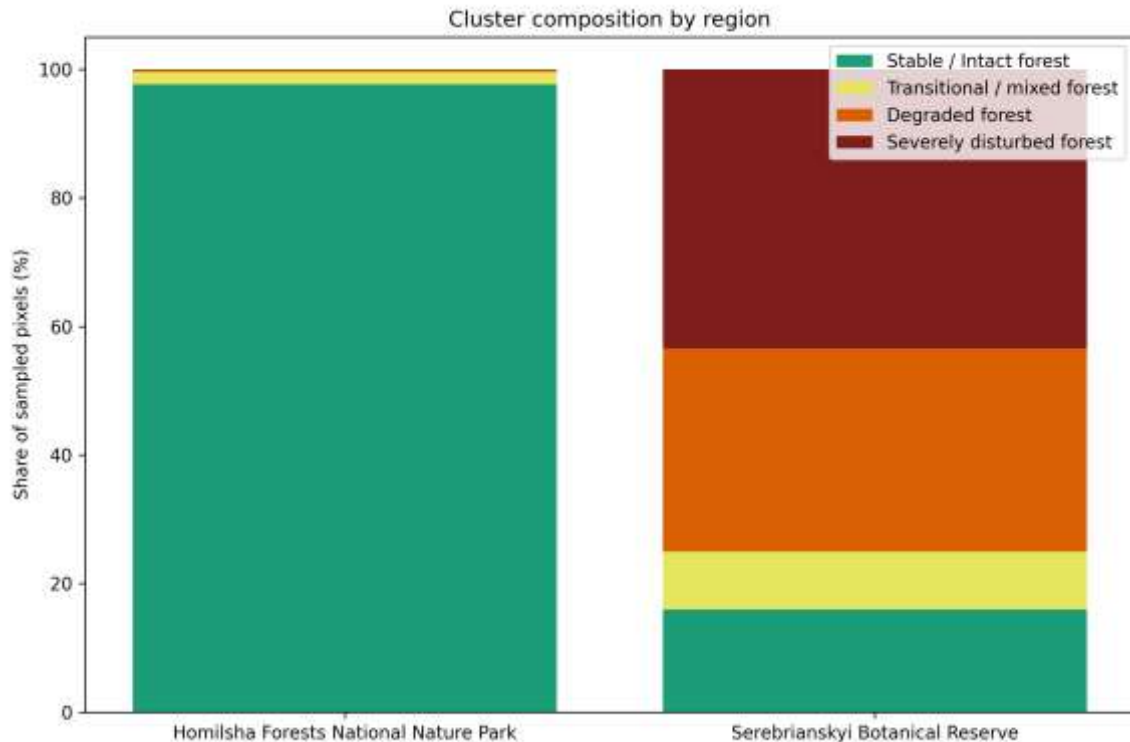
Overall, the spatial maps show a transition in the Serebrianykyi Botanical Reserve from stable conditions in 2021 to sparse fragmented disturbance in 2022, broader disturbed zones in 2023, and extensive connected damaged areas in 2024–2025. The control forest did not show a comparable pattern and remained dominated by the stable/improved class through

out the study period. This result supports the interpretation that the disturbance signal in the conflict-affected forest reflects a real spatial expansion of forest damage rather than random variation.

Unsupervised classification reveals a gradient from intact to severely disturbed forest. The unsupervised classification separated the sampled forest pixels into four semantic classes: stable/intact forest, transitional/mixed forest,

degraded forest, and severely disturbed forest. This classification was based on multi-temporal Sentinel-1 features and allowed the forest condition to be represented as a gradient rather than

as a binary damaged–undamaged pattern. As shown in Figure 13, the relative proportions of these classes differed strongly between the two study areas.



The classes include stable/intact forest, transitional/mixed forest, degraded forest, and severely disturbed forest

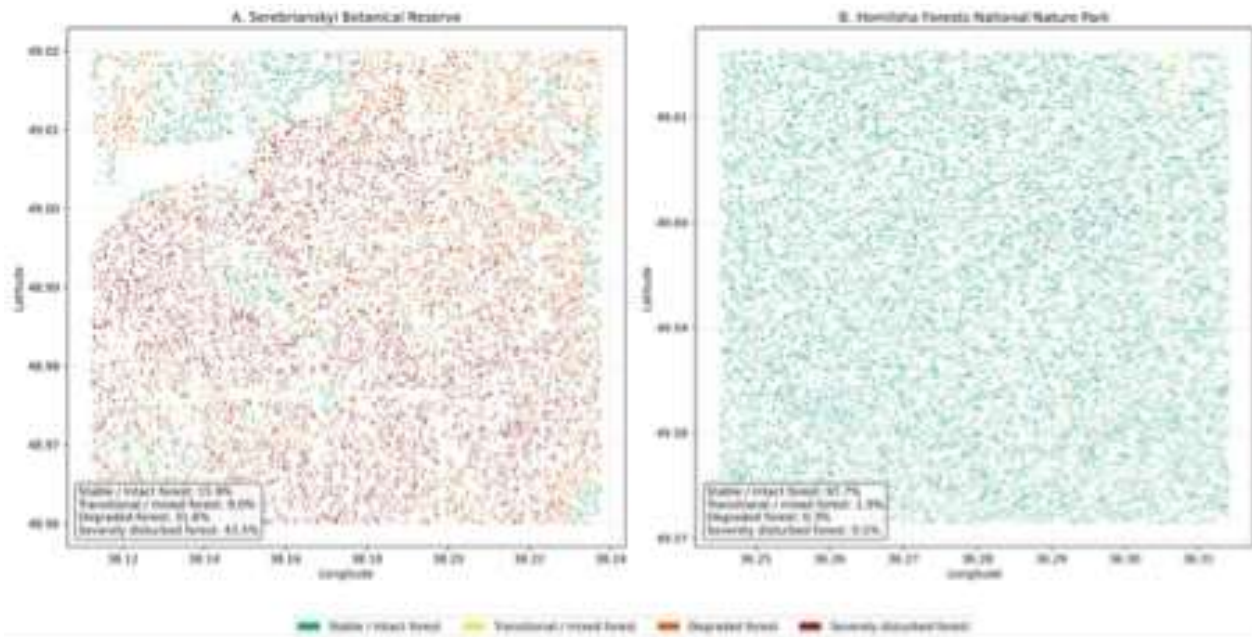
Fig. 13 – Composition of semantic forest-condition classes derived from K-means clustering in the Serebrianskyi Botanical Reserve and Homilsha Forests National Nature Park

The control site was dominated by the stable/intact class, which accounted for 97.7% of sampled pixels. The remaining classes represented only a small fraction of the area, including 1.9% transitional/mixed forest, 0.3% degraded forest, and 0.1% severely disturbed forest. In contrast, the Serebrianskyi Botanical Reserve showed a substantially different composition. Only 15.9% of sampled pixels were assigned to the stable/intact class, while 9.0% were classified as transitional/mixed, 31.6% as degraded, and 43.5% as severely disturbed. Thus, degraded and severely disturbed classes together accounted for 75.1% of the sampled forest in the conflict-affected site, compared with only 0.4% in the control site. The spatial distribution of these classes is shown in Figure 14.

The spatial pattern of the classes was also strongly different between the two study areas. In the Serebrianskyi Botanical Reserve,

degraded and severely disturbed classes occupied large parts of the AOI and formed broad spatially continuous zones. The stable/intact class was restricted to a smaller proportion of the area and was spatially fragmented. The transitional/mixed class occupied an intermediate share and was located between the more stable and more disturbed parts of the AOI. In the Homilsha control site, the stable/intact class covered almost the entire sampled area, while the other classes appeared only as rare and isolated pixels without broad spatial continuity.

These results are consistent with the temporal and damage-class analyses presented in the previous sections. The conflict-affected forest was not only characterized by a larger damaged share, but also by a clear shift of the feature space toward degraded and severely disturbed conditions. In contrast, the control forest remained concentrated in the stable/intact class.



Colors indicate stable/intact forest, transitional/mixed forest, degraded forest, and severely disturbed forest

Fig. 14 – Spatial distribution of semantic forest-condition classes derived from K-means clustering in the Serebrianskyi Botanical Reserve and Homilsha Forests National Nature Park

Therefore, the unsupervised classification supports the interpretation that the disturbance signal is expressed as a continuous gradient of forest condition and not only as the presence or absence of damage. The main result is that the unsupervised classification clearly differentiated the conflict-affected forest from the control site and identified a strong predominance of degraded and severely disturbed classes in the Serebrianskyi Botanical Reserve.

Supporting anomaly detection and integrated evidence of forest disturbance. Anomaly detection provided additional support for the separation between the two study areas. Isolation Forest identified a substantially larger anomalous share in the conflict-affected Serebrianskyi Botanical Reserve than in the Homilsha control site. In the combined analysis,

22.8% of sampled pixels in Serebrianskyi were classified as anomalous, compared with 2.2% in Homilsha. This result indicates that the radar-temporal structure of the conflict-affected forest departed more strongly from the general pattern of forest condition represented in the full dataset (Tabl. 2).

This anomaly-based result is consistent with the main findings of the previous sections. The temporal analysis showed a progressive decline in RVI and backscatter in the Serebrianskyi forest relative to the 2020–2021 baseline, while the control site remained close to baseline or slightly positive. The damage classification showed a strong increase in disturbed forest area in Serebrianskyi, with the changed share reaching 70.1% and the destroyed share 42.7% in 2025. The spatial maps showed that

Table 2
Summary of anomaly detection results for the conflict-affected and control forest sites

Metric	Homilsha Forests National Nature Park	Serebrianskyi Botanical Reserve
n_pixels	12003	10934
anomaly_pixels	261	2492
mean_anomaly_score	0.42	0.48
median_anomaly_score	0.42	0.47
anomaly_share	0.02	0.23
run_name	combined	combined

this disturbance was not randomly distributed, but formed broad connected zones that expanded over time. In addition, the unsupervised classification showed that the conflict-affected AOI was dominated by degraded and severely disturbed classes, whereas the control site remained almost entirely within the stable/intact class.

Taken together, these results show agreement across several analytical levels. The conflict-affected forest showed a negative temporal shift in radar vegetation signal, a progressive increase in damaged area, a spatial expansion of connected disturbed zones, and a strong concentration of pixels assigned to degraded and severely disturbed classes. The control site did not show the same pattern. This overall agreement supports the interpretation that the observed changes in the Serebrianskyi Botanical Reserve reflect substantial forest disturbance rather than background variation.

Conflict-related disturbance signal in the Serebrianskyi forest. The results indicate that the forest disturbance signal observed in the Serebrianskyi Botanical Reserve is closely aligned with the spatial and temporal context of military activity in eastern Ukraine. The study area is located near the active frontline and was defined as a conflict-affected AOI exposed to warfare, military operations, and associated disturbances since 2022, while the Homilsha Forests National Nature Park was selected as a control site with lower exposure to direct military activity. This contrast provides an important interpretive basis for separating disturbance-related vegetation change from broader regional or seasonal variability.

The post-2022 decline in Sentinel-1 RVI, VV, and especially VH backscatter in the Serebrianskyi forest suggests a reduction in forest structural complexity. During the pre-disturbance period, the Serebrianskyi AOI showed relatively stable radar vegetation conditions, but after 2023 the RVI signal declined substantially and continued to decrease through 2024–2025. This decline was accompanied by reductions in both VV and VH backscatter, with a particularly strong decrease in the cross-polarized VH component. Because VH backscatter is more sensitive to volume scattering within vegetation canopies, its decline supports the interpretation that the observed signal reflects canopy degradation, loss of woody vegetation structure, or reduced vertical complexity rather than only short-term seasonal variation. This pattern is consistent with the expected effects of war-related

disturbance on forest ecosystems. Shelling, explosions, fire events, movement of heavy military equipment, trenching, soil disturbance, fragmentation, and restricted forest management access can all contribute to canopy damage, tree mortality, exposure of bare or burned surfaces, and simplification of forest structure. Such processes would be expected to reduce vegetation-related volume scattering and therefore lower RVI and VH values. The sharp decline observed after 2022 is therefore not only temporally consistent with intensified military pressure, but also physically consistent with the way SAR signals respond to changes in vegetation structure. The comparison with the Homilsha control site strengthens this interpretation. Both AOIs were processed using the same Sentinel-1 data source, seasonal compositing window, forest mask, and baseline-relative workflow. However, the control forest did not show a comparable negative trend; instead, it remained stable or slightly positive relative to the baseline. Therefore, the divergence between the two forests indicates that the Serebrianskyi decline cannot be explained by regional seasonal variability alone. Rather, the combined decrease in RVI, VV, and VH points to a disturbance-driven structural change in the conflict-affected forest.

Conflict-related disturbance signal in the Serebrianskyi forest. The temporal pattern of disturbance in the Serebrianskyi Botanical Reserve suggests that the detected forest degradation was not a single short-term anomaly, but a progressive process that intensified after the beginning of large-scale military activity. During 2020–2021, both study areas remained close to baseline conditions, and no measurable damage signal was detected in either AOI. In 2022, disturbed pixels appeared in both regions, but the pattern was still limited and fragmented. This early-stage disturbance may reflect the initial emergence of abnormal vegetation signals, but it did not yet form a broad spatial pattern.

A clearer divergence became visible from 2023 onward. In the Serebrianskyi forest, the RVI deviation from the 2020–2021 baseline became negative in 2023 and then declined sharply in 2024–2025. The annual results show that RVI decreased by about 8.6% in 2023, 26.6% in 2024, and 28.7% in 2025 relative to the pre-disturbance baseline. The strongest shift occurred between 2023 and 2024, indicating that the main structural change in the vegetation signal developed after the initial phase of disturbance. In contrast, the Homilsha control site

remained stable or slightly positive during the same period, which strengthens the interpretation that the Serebrianskyi trajectory reflects localized disturbance pressure rather than a shared regional trend. The damage classification results confirm this cumulative pattern. In the Serebrianskyi AOI, the share of changed forest pixels increased from 8.7% in 2022 to 27.9% in 2023, then rose sharply to 61.3% in 2024 and 70.1% in 2025. The destroyed class followed an even stronger trajectory, increasing from only 0.4% in 2022 and 4.9% in 2023 to 35.7% in 2024 and 42.7% in 2025. This indicates that the disturbance did not only expand spatially, but also increased in severity. The shift from mostly stable forest conditions toward degraded and destroyed classes is consistent with prolonged and repeated disturbance rather than a temporary fluctuation in radar response.

The spatial maps further support this interpretation. In 2021, both AOIs were almost entirely stable or improved, with no visible clusters of degraded or destroyed forest. In 2022, disturbed pixels appeared as sparse and scattered patches in both sites. By 2023, however, the Serebrianskyi forest began to show broader disturbed zones, especially in the central and southern parts of the AOI. In 2024 and 2025, these areas expanded into large connected damaged zones, and the destroyed class became spatially dominant across much of the conflict-affected forest. The control site did not show a comparable spatial transition and remained dominated by stable or improved pixels throughout the same period. This temporal and spatial sequence is consistent with the effects of prolonged military pressure on forest ecosystems. Repeated shelling, fire events, mechanical disturbance from military equipment, trench construction, restricted access for forest management, and fragmentation of forest stands can gradually convert initially localized damage into broader structural degradation. The observed progression from sparse disturbance in 2022, to expanded degraded areas in 2023, and to extensive connected damaged zones in 2024–2025 therefore supports the interpretation that the Serebrianskyi forest experienced cumulative war-related disturbance over time.

Stability and slight improvement of the Homilsha control forest. The Homilsha Forests National Nature Park showed a markedly different temporal pattern from the conflict-affected Serebrianskyi forest. While the Serebrianskyi AOI experienced a sustained post-2022 decline in RVI and backscatter, the Homilsha control

site remained comparatively stable throughout the observation period. Its RVI values did not show a negative trajectory; instead, they increased slightly from 0.72 in 2020 to 0.78 in 2025. The baseline-relative comparison also showed a positive deviation in later years, reaching approximately 5.1% in 2024 and 8.5% in 2025. This indicates that the control forest did not undergo the same structural degradation detected in the conflict-affected AOI. The damage classification results support this interpretation. In Homilsha, the share of changed forest pixels remained low and did not accumulate through time. Although 9.4% of pixels were classified as changed in 2022 and 11.6% in 2023, this share declined to 8.5% in 2024 and only 1.4% in 2025. The destroyed class remained negligible throughout the post-2022 period, with values of 0.5% in 2022, 0.7% in 2023, 0.6% in 2024, and 0.0% in 2025. Therefore, the control site showed only limited background variability rather than progressive degradation.

The slight positive shift in Homilsha may reflect several non-exclusive factors. It may be associated with natural interannual variability in vegetation condition, favorable moisture or growing-season conditions, or local ecological differences between the two forests. Homilsha is described as a mesophytic broadleaved and mixed forest system with a well-developed multi-layered structure, dense canopy, distinct shrub layer, and more favorable moisture conditions compared with the Serebrianskyi AOI. These structural and ecological characteristics may contribute to higher resilience of the radar vegetation signal and may partly explain why the site remained stable during the study period. Another plausible explanation is a temporary reduction in direct anthropogenic pressure during the war period. In protected or less accessible forest areas, reduced recreation, forestry operations, traffic, or other forms of human activity may allow vegetation structure to remain stable or show modest improvement. However, this interpretation should be treated carefully. The present analysis does not directly measure changes in forest management intensity, visitor pressure, local land use, or microclimatic conditions. Therefore, the observed positive RVI shift in Homilsha should not be interpreted as confirmed recovery, but rather as an indication that the control forest remained structurally stable or slightly improved according to Sentinel-1-derived indicators. Overall, the Homilsha site functions as an important reference for interpreting the Serebrianskyi disturbance signal.

Because both AOIs were analyzed using the same Sentinel-1 workflow, seasonal window, forest mask, baseline definition, and classification procedure, the absence of progressive degradation in Homilsha strengthens the conclusion that the strong decline and spatial expansion of damaged classes in Serebrianskyi were not caused by general regional variability alone. Instead, the contrast between the two sites supports the interpretation of localized disturbance pressure in the conflict-affected forest.

Methodological value, uncertainty, and implications for war-affected forest monitoring. The results show that Sentinel-1 SAR data, combined with baseline-relative change analysis and unsupervised machine learning, can provide a practical approach for monitoring forest disturbance in areas where field access is limited by military activity. The use of RVI, VV, and VH/VV

indicators made it possible to detect both temporal decline and spatial expansion of damage in the Serebrianskyi forest, while the control site helped distinguish localized disturbance from broader regional variability.

However, the derived classes should be interpreted as remote-sensing-based indicators of structural disturbance rather than direct field-validated damage categories. SAR signals can be affected by canopy structure, moisture, surface roughness, fire effects, and acquisition conditions, and the two AOIs differ in vegetation composition and ecological context. Despite these uncertainties, the convergence of temporal, spatial, and machine learning evidence supports the usefulness of this workflow for rapid assessment and long-term monitoring of war-affected forests.

Conclusions

This study assessed forest disturbance in conflict-affected eastern Ukraine using Sentinel-1 SAR data, Radar Vegetation Index (RVI), baseline-relative change analysis, spatial classification, and unsupervised machine learning. Two forest areas were compared: the Serebrianskyi Botanical Reserve, located near the active frontline and exposed to military activity, and the Homilsha Forests National Nature Park, used as a control site with lower direct conflict exposure. Sentinel-1 VV and VH backscatter data for 2020–2025 were processed in Google Earth Engine, restricted to forest pixels, aggregated into summer seasonal composites, and compared against a 2020–2021 pre-disturbance baseline.

The results showed a clear post-2022 divergence between the two forests. In the Serebrianskyi AOI, RVI declined from stable pre-disturbance values of about 0.93–0.94 in 2020–2022 to 0.86 in 2023, 0.69 in 2024, and 0.67 in 2025. This decline was accompanied by decreases in both VV and VH backscatter, with the stronger reduction in VH indicating a loss of vegetation volume scattering and canopy structural complexity. In contrast, the Homilsha control site remained stable and showed a slight positive RVI shift, increasing from 0.72 in 2020 to 0.78 in 2025.

Baseline-relative analysis confirmed that the main disturbance signal in the Serebrianskyi forest emerged after 2022 and intensified in 2024–2025. RVI decreased by approximately 8.6% in 2023, 26.6% in 2024, and 28.7% in 2025 relative to the pre-disturbance baseline. The share of changed forest pixels increased from

8.7% in 2022 to 27.9% in 2023, 61.3% in 2024, and 70.1% in 2025. The destroyed class increased especially strongly, reaching 35.7% in 2024 and 42.7% in 2025. Spatial maps showed that this disturbance developed from sparse fragmented patches in 2022 into broad, connected damaged zones by 2024–2025.

Machine learning results supported the same interpretation. K-means clustering identified a strong predominance of degraded and severely disturbed classes in the Serebrianskyi forest, where these classes together accounted for 75.1% of sampled pixels. In contrast, the Homilsha control site was dominated by stable/intact forest, representing 97.7% of sampled pixels. Isolation Forest anomaly detection also showed a much higher anomalous share in Serebrianskyi than in Homilsha, further supporting the separation between the conflict-affected and control forests.

The Serebrianskyi forest experienced a substantial and spatially expanding disturbance signal after 2022, consistent with the timing and location of prolonged military activity. The stability of the Homilsha control site cannot be explained by regional seasonal variability alone. Although the derived damage classes should be interpreted as remote-sensing-based indicators rather than field-validated damage categories, the convergence of temporal decline, spatial expansion, classification results, and anomaly detection supports the usefulness of Sentinel-1 RVI and SAR-based machine learning workflows for monitoring war-affected forests where direct field access is limited.

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 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 authors 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. Maksymenko, N. V., Voronin, V. O., & Burchenko, S. V. (2023). Remote Monitoring of the Impact of Military Actions on Forest Landscapes of the Kharkiv Region. *Man and Environment. Issues of Neoecology*, (40), 20–32. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2023-40-02>
2. Chornohor, L. F., Nekos, A. N., Titenko, H. V., & Chornohor, L. L. (2022). Mathematical Models for Assessing the Environmental Consequences of the Pyrogenic Factor Impact on Forest Ecosystems. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Ecology"*, (27), 51–62. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2022-27-04>
3. Hanson, T. (2018). Biodiversity conservation and armed conflict: A warfare ecology perspective. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1429(1), 50–65. <https://doi.org/10.1111/nyas.13689>
4. Lawrence, M. J., Stemberger, H. L. J., Zolderdo, A. J., Struthers, D. P., & Cooke, S. J. (2015). The effects of modern war and military activities on biodiversity and the environment. *Environmental Reviews*, 23(4), 443–460. <https://doi.org/10.1139/er-2015-0039>
5. McNeely, J. A. (2003). Conserving forest biodiversity in times of violent conflict. *Oryx*, 37(2), 142–152. <https://doi.org/10.1017/S0030605303000334>
6. Mahreen, K. (2022). The environmental impacts of war and conflict. Institute of Development Studies. [https://opendocs.ids.ac.uk/articles/report/The Environmental Impacts of War and Conflict/26427280](https://opendocs.ids.ac.uk/articles/report/The%20Environmental%20Impacts%20of%20War%20and%20Conflict/26427280)
7. Gaynor, K. M., Fiorella, K. J., Gregory, G. H., Kurz, D. J., Seto, K. L., Withey, L. S., & Brashares, J. S. (2016). War and wildlife: Linking armed conflict to conservation. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 14(10), 533–542. <https://doi.org/10.1002/fee.1433>
8. Ordway, E. M. (2015). Political shifts and changing forests: Effects of armed conflict on forest conservation in Rwanda. *Global Ecology and Conservation*, 3, 448–460. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2015.01.013>
9. Daiyoub, A., Gelabert, P., Saura-Mas, S., & Vega-García, C. (2023). War and deforestation: Using remote sensing and machine learning to identify the war-induced deforestation in Syria 2010–2019. *Land*, 12(8), 1509. <https://doi.org/10.3390/land12081509>
10. Butsic, V., Baumann, M., Shortland, A., Walker, S., & Kuemmerle, T. (2015). Conservation and conflict in the Democratic Republic of Congo: The impacts of warfare, mining, and protected areas on deforestation. *Biological Conservation*, 191, 266–273. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.06.037>
11. Kaplan, G., Rashid, T., Gasparović, M., & others. (2022). Monitoring war-generated environmental security using remote sensing: A review. *Land Degradation & Development*. <https://doi.org/10.1002/ldr.4249>
12. Shevchuk, S. A., Vyshnevskiy, V. I., & Bilous, O. P. (2022). The use of remote sensing data for investigation of environmental consequences of Russia–Ukraine war. *Journal of Landscape Ecology*, 15(3), 36–53. <https://doi.org/10.2478/jlecol-2022-0017>
13. Sticher, V., Wegner, J. D., & Pfeifle, B. (2023). Toward the remote monitoring of armed conflicts. *PNAS Nexus*, 2(6), pgad181. <https://academic.oup.com/pnasnexus/article/2/6/pgad181/7185602>
14. Mandal, D., Kumar, V., Ratha, D., Dey, S., Bhattacharya, A., Lopez-Sanchez, J. M., McNairn, H., & Rao, Y. S. (2020). Dual polarimetric radar vegetation index for crop growth monitoring using Sentinel-1 SAR data. *Remote Sensing of Environment*, 247, 111954. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111954>
15. Plank, S. (2014). Rapid damage assessment by means of multi-temporal SAR—A comprehensive review and outlook to Sentinel-1. *Remote Sensing*, 6(6), 4870–4906. <https://doi.org/10.3390/rs6064870>

16. Vreugdenhil, M., Wagner, W., Bauer-Marschallinger, B., Pfeil, I., Teubner, I., Rüdiger, C., & Strauss, P. (2018). Sensitivity of Sentinel-1 backscatter to vegetation dynamics: An Austrian case study. *Remote Sensing*, 10(9), 1396. <https://doi.org/10.3390/rs10091396>
17. Vreugdenhil, M., Navacchi, C., Bauer-Marschallinger, B., Hahn, S., Steele-Dunne, S., Pfeil, I., & Wagner, W. (2020). Sentinel-1 cross ratio and vegetation optical depth: A comparison over Europe. *Remote Sensing*, 12(20), 3404. <https://doi.org/10.3390/rs12203404>
18. De Luca, G., Silva, J. M. N., Di Fazio, S., & Modica, G. (2022). Integrated use of Sentinel-1 and Sentinel-2 data and open-source machine learning algorithms for land cover mapping in a Mediterranean region. *European Journal of Remote Sensing*, 55(1), 52–70. <https://doi.org/10.1080/22797254.2021.2018667>
19. Hirschmugl, M., Deutscher, J., Sobe, C., Bouvet, A., Mermoz, S., & Schardt, M. (2020). Use of SAR and optical time series for tropical forest disturbance mapping. *Remote Sensing*, 12(4), 727. <https://doi.org/10.3390/rs12040727>
20. Saim, A. A., & Aly, M. H. (2025). Fusion-based approaches and machine learning algorithms for forest monitoring: A systematic review. *Wild*, 2(1), 7. <https://www.mdpi.com/3042-4526/2/1/7>
21. Gatti, R. C., Lobos, R. B. C., Torresani, M., & others. (2025). An early warning system based on machine learning detects huge forest loss in Ukraine during the war. *Global Ecology and Conservation*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351989425000289>
22. Mullissa, A., Reiche, J., & Herold, M. (2023). Deep learning and automatic reference label harvesting for Sentinel-1 SAR-based rapid tropical dry forest disturbance mapping. *Remote Sensing of Environment*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425723003504>
23. Xu, C., Ding, Y., Zheng, X., Wang, Y., Zhang, R., Zhang, H., & others. (2022). Comparison of machine learning and feature selection methods for maize biomass estimation using Sentinel-1 SAR, Sentinel-2 vegetation indices, and biophysical variables. *Remote Sensing*, 14(16), 4083. <https://doi.org/10.3390/rs14164083>

Submission received: 03.04.2026 / Revised: 04.05.2026 / Accepted: 08.05.2026 / Published: 30.05.2026

Л. А. ГОРОШКОВА, д-р екон. наук, проф.,

Професор кафедри екології

e-mail: goroshkova69@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7142-4308>

Національний університет «Києво-Могилянська академія»

вул. Сковороди, 2, Київ, 04070, Україна

О. І. МЕНЬШОВ, д-р геол. наук,

Старший науковий співробітник кафедри геоінформатики

e-mail: menshov@knu.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7280-8453>

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

вул. Володимирська, 60, Київ, 01033, Україна

Д. В. МАСЛОВ,

Аспірант кафедри екології

e-mail: 20denismaslov@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-7397-8329>

Національний університет «Києво-Могилянська академія»

вул. Сковороди, 2, Київ, 04070, Україна

ОЦІНКА ВІЙСЬКОВИХ ВПЛИВІВ НА ПРИРОДООХОРОННІ ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ ЗА ДОПОМОГОЮ SENTINEL-1 ТА МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Мета. Оцінити військові впливи на природоохоронні території України за допомогою даних Radar Vegetation Index (RVI) Sentinel-1 та методів машинного навчання з метою виявлення просторових і часових закономірностей порушення рослинності та трансформації екосистем в умовах воєнного часу.

Методи. Просторові та часові зміни аналізувалися із застосуванням методів дистанційного зондування Землі у поєднанні з методами машинного навчання, зокрема алгоритмами неконтрольованої класифікації для виявлення закономірностей порушення рослинності та трансформації

екосистем. Додатково застосовано порівняльний аналіз і аналіз часових рядів для оцінки впливу військової діяльності на лісові екосистеми в умовах воєнного часу.

Результати. Оцінено вплив військової діяльності на лісові екосистеми сходу України з використанням даних Sentinel-1 SAR, індексу рослинності Radar Vegetation Index (RVI), аналізу змін відносно базового періоду та методів неконтрольованого машинного навчання. Кількісна оцінка та характеристика порушень лісових екосистем, пов'язаних із воєнними діями, у межах Серебрянського ботанічного заказника, який безпосередньо зазнає впливу активних бойових дій, а також визначення масштабів, інтенсивності та часової динаміки цих пошкоджень визначено відносно довоєнного базового періоду, для чого використовувалася контрольна територія – Національний природний парк «Гомільшанські ліси», який не зазнавав впливу бойових дій. Оцінено, наскільки показники Sentinel-1 RVI, а також коефіцієнти зворотного розсіювання VV і VH здатні відображати просторові закономірності та поступовий розвиток порушень лісів, спричинених військовими діями, протягом 2020–2025 років. Дані Sentinel-1 оброблялися у середовищі Google Earth Engine та були обмежені лише лісовими пікселями за допомогою маски земного покриття. Для кожного року були сформовані літні композити, а довоєнний базовий період (2020–2021 роки) використовувався для кількісної оцінки післявоєнних змін. Аналіз включав оцінку річних трендів RVI, класифікацію пошкоджень на основі правил, кластеризацію методом K-means та виявлення ізольованих аномалій лісового покриття. Після 2022 року до 2025 року в межах Серебрянської дослідної території (ROI) зафіксовано суттєве зниження значень RVI. Частка змінених лісових пікселів значно збільшена, зокрема частка сильно порушених пікселів також значно збільшилася. Водночас у межах Гомільшанської дослідної території (ROI) зберігалася стабільна ситуація. Результати машинного навчання підтвердили ці тенденції.

Висновки. Методи SAR продемонстрували високу ефективність для дистанційного моніторингу в умовах обмеженого польового доступу, однак отримані категорії пошкоджень слід розглядати як індикатори дистанційного зондування, а не як польово підтверджені категорії деградації екосистем.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *Sentinel-1, SAR, Radar Vegetation Index, порушення лісів, умови лісів, дистанційне зондування Землі, машинне навчання*

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. Автори зробили рівний внесок в це дослідження.

Декларація про використання ШІ

Автори використовували ChatGPT-5.5 (OpenAI, 2026) виключно для мовного редагування, структурного впорядкування тексту. Весь науковий контент, матеріали та висновки створені авторами. Усі наукові положення, інтерпретації, результати та висновки критично перевірені авторами, які несуть повну відповідальність за зміст рукопису.

Список використаної літератури

1. Максименко, Н. В., Воронін, В. О., Бурченко, С. В. Дистанційний моніторинг впливу військових дій на лісові ландшафти Харківської області. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2023. Вип. 40. С. 20-32. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2023-40-02>
2. Черногор, Л. Ф., Некос, А. Н., Тітенко, Г. В., Черногор, Л. Л. Математичні моделі для оцінки екологічних наслідків впливу пірогенного фактору на лісові екосистеми. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна серія «Екологія»*. 2022. Вип.27. С.51-62. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2022-27-04>
3. Hanson, T. Biodiversity conservation and armed conflict: A warfare ecology perspective. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2018. Vol. 1429. No 1. P.50–65. <https://doi.org/10.1111/nyas.13689>

4. Lawrence, M. J., Stemberger, H. L. J., Zolderdo, A. J., Struthers, D. P., Cooke, S. J. The effects of modern war and military activities on biodiversity and the environment. *Environmental Reviews*. 2015. Vol. 23. No 4. P. 443–460. <https://doi.org/10.1139/er-2015-0039>
5. McNeely, J. A. Conserving forest biodiversity in times of violent conflict. *Oryx*. 2003. Vol. 37. No 2. P. 142–152. <https://doi.org/10.1017/S0030605303000334>
6. Mahreen, K. The environmental impacts of war and conflict. Institute of Development Studies. 2022. https://open-docs.ids.ac.uk/articles/report/The_Environmental_Impacts_of_War_and_Conflict/26427280
7. Gaynor, K. M., Fiorella, K. J., Gregory, G. H., Kurz, D. J., Seto, K. L., Withey, L. S., Brashares, J. S. War and wildlife: Linking armed conflict to conservation. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2016. Vol.14. No 10. P. 533–542. <https://doi.org/10.1002/fee.1433>
8. Ordway, E. M. Political shifts and changing forests: Effects of armed conflict on forest conservation in Rwanda. *Global Ecology and Conservation*. 2015. Vol.3. P.448–460. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2015.01.013>
9. Daiyoub, A., Gelabert, P., Saura-Mas, S., Vega-García, C. War and deforestation: Using remote sensing and machine learning to identify the war-induced deforestation in Syria 2010–2019. *Land*. 2023. Vol. 12. No 8. P. 1509. <https://doi.org/10.3390/land12081509>
10. Butsic, V., Baumann, M., Shortland, A., Walker, S., Kuemmerle, T. Conservation and conflict in the Democratic Republic of Congo: The impacts of warfare, mining, and protected areas on deforestation. *Biological Conservation*. 2015. Vol. 191. P. 266–273. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.06.037>
11. Kaplan, G., Rashid, T., Gasparović, M., & others. Monitoring war-generated environmental security using remote sensing: A review. *Land Degradation & Development*. 2022. <https://doi.org/10.1002/ldr.4249>
12. Shevchuk, S. A., Vyshnevskiy, V. I., Bilous, O. P. The use of remote sensing data for investigation of environmental consequences of Russia–Ukraine war. *Journal of Landscape Ecology*. 2022. Vol. 15. No 3. P. 36–53. <https://doi.org/10.2478/jlecol-2022-0017>
13. Sticher, V., Wegner, J. D., Pfeifle, B. Toward the remote monitoring of armed conflicts. *PNAS Nexus*. 2023. Vol. 2. No 6. pgad181. <https://academic.oup.com/pnasnexus/article/2/6/pgad181/7185602>
14. Mandal, D., Kumar, V., Ratha, D., Dey, S., Bhattacharya, A., Lopez-Sanchez, J. M., McNairn, H., Rao, Y. S. Dual polarimetric radar vegetation index for crop growth monitoring using Sentinel-1 SAR data. *Remote Sensing of Environment*. 2020. Vol. 247. P. 111954. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111954>
15. Plank, S. Rapid damage assessment by means of multi-temporal SAR—A comprehensive review and outlook to Sentinel-1. *Remote Sensing*. 2014. Vol. 6(6. P. 4870–4906. <https://doi.org/10.3390/rs6064870>
16. Vreugdenhil, M., Wagner, W., Bauer-Marschallinger, B., Pfeil, I., Teubner, I., Rüdiger, C., Strauss, P. Sensitivity of Sentinel-1 backscatter to vegetation dynamics: An Austrian case study. *Remote Sensing*. 2018. Vol.10. No 9. P. 1396. <https://doi.org/10.3390/rs10091396>
17. Vreugdenhil, M., Navacchi, C., Bauer-Marschallinger, B., Hahn, S., Steele-Dunne, S., Pfeil, I., & Wagner, W. Sentinel-1 cross ratio and vegetation optical depth: A comparison over Europe. *Remote Sensing*. 2020. Vol.12(20. P. 3404. <https://doi.org/10.3390/rs12203404>
18. De Luca, G., Silva, J. M. N., Di Fazio, S., Modica, G. Integrated use of Sentinel-1 and Sentinel-2 data and open-source machine learning algorithms for land cover mapping in a Mediterranean region. *European Journal of Remote Sensing*. 2022. Vol. 55. No 1. P.52–70. <https://doi.org/10.1080/22797254.2021.2018667>
19. Hirschmugl, M., Deutscher, J., Sobe, C., Bouvet, A., Mermoz, S., Schardt, M. Use of SAR and optical time series for tropical forest disturbance mapping. *Remote Sensing*. 2020. Vol.12. No 4. P. 727. <https://doi.org/10.3390/rs12040727>
20. Saim, A. A., Aly, M. H. Fusion-based approaches and machine learning algorithms for forest monitoring: A systematic review. *Wild*. 2025. Vol. 2. No 1. P. 7. URL: <https://www.mdpi.com/3042-4526/2/1/7>
21. Gatti, R. C., Lobos, R. B. C., Torresani, M., & others. An early warning system based on machine learning detects huge forest loss in Ukraine during the war. *Global Ecology and Conservation*. 2025. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351989425000289>
22. Mullissa, A., Reiche, J., Herold, M. Deep learning and automatic reference label harvesting for Sentinel-1 SAR-based rapid tropical dry forest disturbance mapping. *Remote Sensing of Environment*. 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425723003504>
23. Xu, C., Ding, Y., Zheng, X., Wang, Y., Zhang, R., Zhang, H., & others. Comparison of machine learning and feature selection methods for maize biomass estimation using Sentinel-1 SAR, Sentinel-2 vegetation indices, and biophysical variables. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. . No 16. P.4083. <https://doi.org/10.3390/rs14164083>

Отримано: 03.04.2026 / Переглянуто: 04.05.2026 / Прийнято: 08.05.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

<https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-14>

УДК (UDC): 504.06:630.2:631.4

В. Л. БОРИСОВА¹, канд. с.-г. наук,

викладач кафедри лісівництва та мисливського господарства

e-mail: borisova.valentina@ukr.net ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6915-1681>

С. А. КРИШТОП¹, 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>

В. В. НАЗАРЕНКО¹, канд. с.-г. наук,

доцент кафедри лісових культур, меліорацій та садово-паркового господарства

e-mail: 0997301084@btu.kharkiv.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1043-1619>

¹Державний біотехнологічний університет,

вул. Алчевських, 44, Харків, 61002, Україна

ДЕГРАДАЦІЯ ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМ ЛІВОБЕРЕЖНОГО ЛІСОСТЕПУ УКРАЇНИ ТА ВПЛИВ НА АГРОЛАНДШАФТИ: DPSIR-ПІДХІД

Мета. Аналітичне узагальнення деградаційних процесів у лісових екосистемах Лівобережного Лісостепу України та їхній зв'язок із екологічним станом прилеглих агроландшафтів з використанням моделі DPSIR

Методи. Застосовано DPSIR-аналіз (ЕЕА, 1999) як концептуальну основу для структурування причинно-наслідкових зв'язків; метод систематизації та узагальнення біотичних чинників тиску на основі даних лісопатологічних обстежень; порівняльний аналіз наукових джерел.

Результати. Емпіричну основу становлять дані обстежень понад 5000 дерев ясеня звичайного (*Fraxinus excelsior* L.), проведених у різні роки в межах багаторічних досліджень (переважно у 2010-х роках) на 52 постійних і 125 тимчасових пробних площах у насадженнях семи лісогосподарських підприємств. Для обґрунтування управлінських заходів використано методичні підходи лісопатологічного моніторингу рівнинної частини України. Систематизовано основні біотичні чинники тиску, зокрема стовбурові шкідники, листогризуки комах, патогенні гриби та бактеріози, взаємодія яких має комплексний (синергетичний) характер. Обґрунтовано причинно-наслідковий ланцюг Тиск → Стан → Вплив. Зниження протиерозійної та водорегулювальної функцій деградованих лісових екосистем узгоджується з погіршенням властивостей ґрунтів і зниженням їх родючості; інтенсифікація ерозійних процесів у прилеглих агроландшафтах узгоджується з даними літературних джерел.

Висновки. Санітарний стан ясеневих деревостанів розглядається як інформативний інтегральний індикатор деградації лісових екосистем і ранній маркер екологічних ризиків для агроландшафтів. Наукова новизна полягає у формалізації та аналітичному обґрунтуванні причинно-наслідкових зв'язків між біотичними чинниками деградації ясеневих деревостанів і екологічними змінами агроландшафтів у межах DPSIR-підходу, а також у використанні санітарного стану як інтегрального індикатора цих процесів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *усихання ясеня, Fraxinus excelsior, санітарний стан деревостанів, ерозія ґрунтів, біотичний тиск, деградація лісів, DPSIR*

Як цитувати: Борисова В. Л., Криштоп С. А., Назаренко В. В. Деградація лісових екосистем Лівобережного Лісостепу України та вплив на агроландшафти: DPSIR-підхід. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2026. Вип. 45. С. 188–198. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-14>

In cites: Borysova, V. L., Kryshtop, Y. A., & Nazarenko, V. V. (2026). Degradation of forest ecosystems in the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine and impact on agricultural landscapes: DPSIR approach. *Man and Environment. Issues of Neoeology*, (45), 188–198. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-14> (in Ukrainian)

Вступ

Лісові екосистеми виконують ключові екологічні функції, зокрема захист ґрунтів від ерозії, регулювання водного балансу,

підтримання біорізноманіття та депонування вуглецю [1–3]. У Лівобережному Лісостепу України їх роль є визначальною для

© Борисова В. Л., Криштоп С. А., Назаренко В. В., 2026



This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

стабілізації. Водночас упродовж останніх десятиліть спостерігається стійке погіршення санітарного стану деревостанів під впливом кліматичних змін, біотичних чинників і антропогенного навантаження, що супроводжується ослабленням їх протиерозійної та водорегулювальної функцій.

Актуальність проблеми зумовлена високим рівнем ерозійної небезпеки: понад 40 % ґрунтів України зазнають ерозійних процесів різної інтенсивності, а близько 30–32 % орних земель піддаються водній ерозії [4, 5]. За умов інтенсифікації землекористування та змін клімату це призводить до зростання екологічних ризиків для агроландшафтів.

Деградація лісових екосистем активно досліджується як на національному, так і на міжнародному рівнях [6–9]. Встановлено, що біотичні чинники, зокрема комахи та патогенні гриби, відіграють ключову роль у процесах ослаблення деревостанів [10–12]. У цьому контексті доцільним є застосування концептуальної рамки DPSIR (Driving forces – Pressure – State – Impact – Response) [13].

Особливе значення має всихання ясена, пов'язане з патогеном *Hymenoscyphus fraxineus*. Із початку 1990-х років всихання ясена поширилося в більшості країн Європи, включаючи Україну [14–20]. Міжнародні дослідження підтверджують ключову роль *H. fraxineus* у розвитку всихання ясена та узагальнюють підходи до управління цими процесами [17–20]. Деградація ясеневих насад-

Об'єкти та методи дослідження

Об'єкт дослідження – лісові екосистеми Лівобережного Лісостепу України з домінуванням ясена звичайного (*Fraxinus excelsior* L.) у складі деревостанів, а також прилеглі агроландшафти.

Предмет дослідження – причинно-наслідкові зв'язки між біотичними чинниками ослаблення ясеневих деревостанів і деградацією агроландшафтів.

Емпіричну основу дослідження становлять дані лісопатологічних обстежень понад 5000 дерев ясена звичайного, проведених у різні роки в межах багаторічних досліджень (переважно у 2010-х роках) на 52 постійних і 125 тимчасових пробних площах у насадженнях семи лісогосподарських підприємств Лівобережного Лісостепу України, узагальнені в монографії [16]. Обстеження виконано відповідно до чинних методичних підходів лісопатологічного моніторингу рівнинної частини України [15] із використанням стандартних таксаційних і діагностичних ознак оцінювання санітар-

жень може зумовлювати зниження екосистемних послуг лісових компонентів агроландшафтів, зокрема їхніх регулювальних і захисних функцій [21, 22].

Водночас дослідження ерозійних процесів в агроландшафтах переважно здійснюються окремо від аналізу стану лісових екосистем, що зумовлює фрагментарність сучасних уявлень про взаємодію цих систем. Попри наявність значного обсягу наукових праць, відсутній узгоджений методичний підхід до інтегрованого аналізу причинно-наслідкових зв'язків між біотичними чинниками ослаблення лісових екосистем і деградацією прилеглих агроландшафтів. Зокрема, бракує інструментів, що дозволяють системно пов'язати конкретні агенти біотичного тиску з екологічними наслідками в межах єдиної аналітичної моделі.

Метою статті є узагальнення деградаційних процесів у лісових екосистемах Лівобережного Лісостепу України та оцінка їхнього зв'язку з екологічним станом прилеглих агроландшафтів на основі DPSIR-підходу з виокремленням біотичних чинників як ключових елементів тиску та використанням ясена звичайного (*Fraxinus excelsior* L.) як індикаторного виду.

Запропонований підхід має аналітико-узагальнювальний характер і спрямований на формалізацію причинно-наслідкових зв'язків, що формує основу для подальшої кількісної оцінки цих процесів.

ного стану деревостанів. У роботі використано систематизовані дані цих обстежень.

Додатково використано літературні джерела, що відображають сучасні оцінки масштабів і інтенсивності ерозійних процесів в агроландшафтах України [4, 5], а також міжнародні дослідження, присвячені деградації лісових екосистем та екосистемним послугам [10, 21].

У дослідженні застосовано методи:

- DPSIR-підхід (EEA, 1999) [13] як базову систему екологічних індикаторів для структуризації причинно-наслідкових зв'язків між біотичним тиском, станом лісових екосистем та їх екологічними наслідками;
- узагальнення методичних підходів до оцінювання санітарного стану деревостанів відповідно до [15];
- метод систематизації біотичних чинників – для класифікації та узагальнення основних агентів тиску (комахи, патогенні гриби, бактеріози) на основі даних лісопатологічних обстежень;

- порівняльний аналіз наукових джерел – для оцінювання узгодженості отриманих результатів із сучасними уявленнями щодо деградації лісів і ерозійних процесів;
- метод нормування та аналітичного узагальнення показників – для інтегральної оцінки компонентів деградації лісових екосистем на основі шкали 0–1 та формалізації взаємозв'язків між компонентами DPSIR [13].

Результати досліджень

Лісові насадження Лівобережного Лісостепу характеризуються значною участю дубово-ясеневих деревостанів, у яких ясен звичайний (*Fraxinus excelsior* L.) разом із дубом звичайним формує перший ярус. Аналіз структури ясеневих насаджень показує їхню низьку збереженість із віком: до VIII класу віку (віку стиглості) зберігається від 0,7 % до 40,2 % насаджень залежно від лісогосподарського підприємства [16].

З метою систематизації основних біотичних чинників тиску на ясеневі деревостани їх структуру узагальнено та подано на схемі (рис. 1), де виокремлено чотири групи агентів – стовбурові шкідники, листогризучі комахи, патогенні гриби та бактеріози – які формують компонент Pressure (P) у DPSIR-рамці.

Біотичні чинники ослаблення деревостанів. *Стовбурові шкідники.* У стовбу-

рмах і гілках дерев виявлено комплекс короїдів: великий ясеневий лубоїд (*Hylesinus crenatus*), строкатий ясеневий лубоїд (*H. fraxini*) та оливковий ясеневий лубоїд (*H. toranio*). Заселеність короїдами вища у дерев із нижчим санітарним станом [8, 16]. Додаткову загрозу становлять деревоточці – червиця в'їдлива (*Zeuzera pyrina*) та червиця пахуча (*Cossus cossus*), що спричиняють механічні пошкодження стовбурів.

Листогризучі комахи. У періоди масового розмноження (2001–2003, 2010–2012 рр.) листя ясена пошкоджували зимовий п'ядун (*Operophtera brumata*), глодова листовійка (*Archips crataegana*), чорний ясеневий пильщик (*Tomostethus nigratus*) та білокрапковий ясеневий пильщик (*Macrophya punctum-album*). Найвища інтенсивність дефоліації зафіксована у міських насадженнях, освітлених лісах і полезахисних лісосмугах [8, 16].



Рис. 1 – Структура біотичних чинників тиску (компонент P) на насадження ясена звичайного (*Fraxinus excelsior* L.) у Лівобережному Лісостепу України

Fig. 1 – Structure of biotic pressure factors (component P) on the planting of common ash (*Fraxinus excelsior* L.) in the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine

Патогенні гриби та некрози. Халаровий некроз, спричинений грибом *Hymenochaeta fraxineus*, фіксується в насадженнях ясеня з початку 2010-х років [7, 14, 17]. Окоренкові гнилі (*Armillaria spp.*) та стовбурові гнилі (*Fomes fomentarius*, *Ganoderma applanatum*, *Laetiporus sulphureus*) поширені в ясеневих деревостанах [16, 17].

Бактеріоз. Туберкульоз ясеня (*Pseudomonas syringae pv. savastanoi*) виявлено в середньому на 18 % дерев (максимально – 86 %). Бактеріальна водянка (*Enterobacter nimipresuralis*) спричиняє додаткове погіршення стану дерев. Збудники проникають через морозобоїни, механічні пошкодження та природні отвори рослин [16, 17].

Вплив деградації лісів на прилеглі агроландшафти. Ослаблення протиерозійної функції лісів, за даними літератури, проявляється у зменшенні щільності крон, загибелі дерев і зрідженні насаджень. У прилеглих агроландшафтах спостерігається інтенсифікація водної та вітрової ерозії, а також погіршення властивостей ґрунтів і зниження їх родючості [4, 5]. Це узгоджується з результатами досліджень щодо ролі рослинного покриву у запобіганні ерозії [21].

Ослаблені полезахисні лісосмуги характеризуються зниженням ефективності вітрозахисної функції, що підвищує ризик дефляційних процесів у прилеглих територіях. Порушення водорегулювальної функції лісів проявляється у зміні гідрологічного режиму, що може супроводжуватися збільшенням поверхневого стоку та змивом родючого шару [21]. Деградація лісових екосистем супроводжується змінами біорізноманіття, мікрокліматичних умов і зменшенням депонування вуглецю [22].

DPSIR як аналітична модель. Показники санітарного стану ясеневих насаджень використано як емпіричну основу для оцінювання компонента State у DPSIR-рамці. Інтерпретація екологічних наслідків здійснюється з урахуванням підходів до класифікації екосистемних послуг та оцінювання їх змін [23, 24]. Представлено причинно-наслідковий ланцюг:

D (Driving forces) – кліматичні зміни, антропогенне навантаження, інвазія патогенів [7, 18, 20].

P (Pressure) – біотичні чинники: шкідники, листогризучі комахи, патогенні гриби та бактеріоз [8, 14, 16].

S (State) – відсутність здорових дерев; 50,6 % сильно ослаблених; дефоліація; поши-

рення гнилей; індекс санітарного стану 2,0–2,6; збереженість насаджень 0,7–40,2 % [16].

I (Impact) – зниження протиерозійної та водорегулювальної функцій лісів; підвищена інтенсивність ерозійних процесів [4, 5]; зміни мікроклімату.

R (Response) – санітарні рубки, моніторинг, контроль шкідників, відновлення лісосмуг [15, 21, 25].

Узагальнення результатів подано у вигляді DPSIR-таблиці (табл. 1) та схеми причинно-наслідкового ланцюга P → S → I (рис. 2).

Аналітична оцінка рівня деградації лісових екосистем. З метою узагальнення отриманих результатів та формалізації причинно-наслідкових зв'язків у межах DPSIR-підходу запропоновано інтегральну аналітичну оцінку рівня деградації лісових екосистем. Інтегральний показник деградації (ID) розглядається як узагальнена функція взаємодії компонентів DPSIR:

$$ID = f(P, S, I), ID \in [0; 1],$$

де: P (Pressure) – інтенсивність біотичного тиску (поширеність шкідників, патогенів, бактеріозів);

S (State) – стан деревостанів (частка ослаблених дерев, дефоліація, санітарний стан, збереженість насаджень);

I (Impact) – екологічні наслідки (зниження протиерозійної та водорегулювальної функцій, інтенсифікація ерозійних процесів, погіршення властивостей ґрунтів).

Значення ID, наближені до 1, відповідають високому рівню деградації, тоді як значення, наближені до 0, характеризують мінімальний прояв деградаційних процесів.

Показник використовується для інтерпретації взаємозв'язків між компонентами DPSIR; його формалізація у вигляді конкретної функції може бути предметом подальших досліджень. Аналіз узагальнених емпіричних даних свідчить, що зростання інтенсивності біотичного тиску (P) та погіршення стану деревостанів (S) відповідає підвищенню рівня деградації (ID → max), що узгоджується з посиленням ерозійних процесів і зниженням стійкості прилеглих агроландшафтів.

Запропонований підхід дозволяє інтегрувати різномірні показники у єдину узагальнену оцінку, що може бути використана як основа для подальшого кількісного моделювання.

Нормування показників здійснювалося за принципом градації інтенсивності

деградаційних ознак у межах шкали 0–1, де значення, наближені до 0, відповідають мінімальному прояву негативних змін, а значення, наближені до 1, – високому рівню деградації. Інтервали шкали сформовано на основі узагальнення емпіричних даних лісопатологічних обстежень та експертної інтерпретації показників санітарного стану деревостанів. Діапазон 0,8–1,0 відповідає високому або критичному рівню degradaційних

процесів, тоді як 0,7–0,9 – високому рівню прояву екологічних наслідків, пов'язаних із інтенсифікацією ерозійних процесів і погіршенням ґрунтових характеристик прилеглих агроландшафтів. Запропонований підхід має експертно-узагальнювальний характер і спрямований насамперед на порівняльну інтерпретацію компонентів DPSIR, а не на формування строгої кількісної моделі деградації.

Таблиця 1

Узагальнення DPSIR-аналізу деградації лісових екосистем (на прикладі ясеневих деревостанів) та впливу на прилеглі агроландшафти Лівобережного Лісостепу

Table 1

Summary of DPSIR analysis of forest ecosystem degradation (using the example of ash stands) and the impact on adjacent agrolandscapes of the Left Bank Forest-Steppe

Компонент DPSIR /Component DPSIR	Ясеневі деревостани / Ash stands (<i>Fraxinus excelsior</i> L.)	Вплив на агроландшафт Impact on agrolandscape
D – Рушійні сили	Кліматичні зміни; антропогенне навантаження; інвазія <i>H. fraxineus</i> [7, 18, 20] / Climate change; anthropogenic load; invasion of <i>H. fraxineus</i> [7, 18, 20]	Порушення водного режиму; підвищення аридності; нестабільність продуктивності [10] / Violation of the water regime; increased aridity; instability of productivity [10]
P – Тиск	Стовбурові шкідники (<i>Hylesinus</i> spp.); листогризучі комахи; халаровий некроз; гнилі (<i>Armillaria</i> , <i>Fomes</i>); бактеріози [8, 14, 16, 17] / Stem pests (<i>Hylesinus</i> spp.); leaf-eating insects; halary necrosis; rots (<i>Armillaria</i> , <i>Fomes</i>); bacteriosis [8, 14, 16, 17]	Ослаблення лісосмуг; зниження вітрозахисної та водорегулювальної функцій [21] / Weakening of forest belts; reduction of wind protection and water regulation functions [21]
S – Стан	Відсутність здорових дерев; 50,6 % сильно ослаблених; дефоліація; поширення гнилей; індекс санітарного стану 2,0–2,6; збереженість 0,7–40,2 % [16] / Lack of healthy trees; 50.6% severely weakened; defoliation; spread of rots; sanitary condition index 2.0–2.6; preservation 0.7–40.2% [16]	Порушення захисних функцій лісів; зниження стійкості агроландшафтів до ерозійних процесів [4, 5] / Violation of protective functions of forests; reduction of resistance of agrolandscapes to erosion processes [4, 5]
I – Вплив	Зниження протиерозійної та водорегулювальної функцій; порушення структури біоценозів; зменшення біорізноманіття [21, 22] / Reduction in anti-erosion and water-regulating functions; disruption of the structure of biocenoses; reduction in biodiversity [21, 22]	Інтенсифікація ерозії (за оцінками літератури – до 30–40 % території); зменшення родючості ґрунтів [4, 5]; погіршення мікроклімату / Intensification of erosion (according to literature estimates - up to 30–40% of the territory); reduction of soil fertility [4, 5]; deterioration of microclimate
R – Відгук	Санітарні рубки; оптимізація складу; моніторинг [15]; контроль шкідників; селекція стійких форм [25]; відновлення лісосмуг / Sanitary felling; optimization of composition; monitoring [15]; pest control; selection of resistant forms [25]; restoration of forest belts	Зниження ерозії; стабілізація ґрунтів; підвищення стійкості агроландшафтів [21] / Reduction of erosion; stabilization of soils; increase of resistance of agrolandscapes [21]

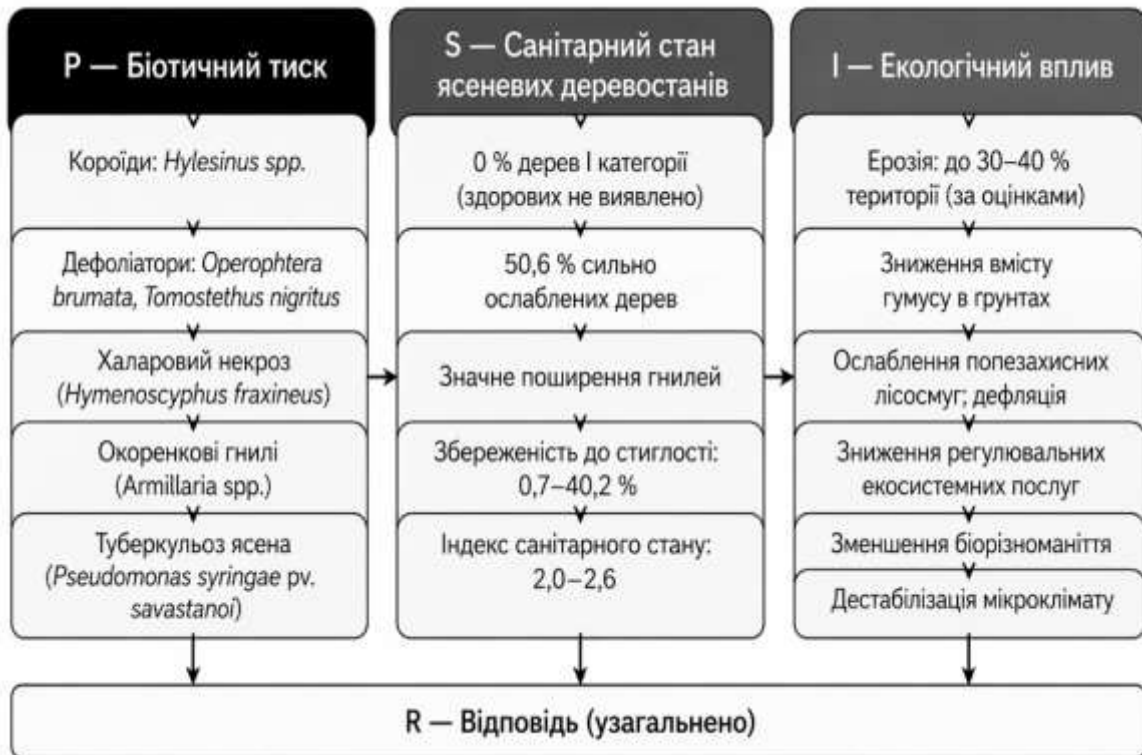


Рис. 2 – Причинно-наслідковий ланцюг P → S → I (DPSIR): відображення зв’язку між біотичним тиском, станом деревостанів та екологічними змінами

Fig. 2 – Causal chain P → S → I (DPSIR): reflecting the relationship between biotic pressure, stand condition and ecological changes

Інтервальна аналітична оцінка компонентів деградації лісових екосистем (нормована шкала 0–1)

Нормовані оцінки компонентів деградації, отримані на основі емпіричних даних

та їх експертно-аналітичного узагальнення, подано в таблиці 2.

Оцінки мають експертно-аналітичний характер і не передбачають точного кількісного вимірювання. Отримані значення свід

Таблиця 2

Аналітична оцінка компонентів деградації лісових екосистем (нормована шкала 0–1)

Table 2

Analytical assessment of components of forest ecosystem degradation (normalized scale 0–1)

Компонент DPSIR / DPSIR Component	Показник / Indicator	Характеристика / Characteristic	Оцінка (0–1) / Score (0–1)
P (Pressure)	Біотичний тиск / Biotic pressure	Висока поширеність шкідників, патогенних грибів і бактеріозів / High prevalence of pests, pathogenic fungi and bacteriosis	0,8–1,0
S (State)	Стан деревостанів / Status of tree stands	Значна частка ослаблених дерев, відсутність здорових насаджень, дефоліація / A significant proportion of weakened trees, lack of healthy stands, defoliation	0,8–1,0
I (Impact)	Екологічні наслідки / Ecological consequences	Посилення ерозійних процесів, погіршення ґрунтових властивостей / Intensification of erosion processes, deterioration of soil properties	0,7–0,9

чать про високий рівень деградації лісових екосистем і узгоджуються з інтенсивністю біотичного тиску та станом деревостанів.

Використання нормованої шкали забезпечує порівняльний аналіз компонентів

деградації та формує основу для подальшого кількісного оцінювання взаємозв'язків між лісовими екосистемами та прилеглими агроландшафтами.

Обговорення

Отримані результати DPSIR-аналізу вказують на системний зв'язок між деградацією лісових екосистем і змінами екологічного стану прилеглих агроландшафтів. Встановлені закономірності можна інтерпретувати як наслідок трансформації біотичного тиску, що призводить до порушення функціональних характеристик лісових насаджень і подальших змін в агроекосистемах. Одним із основних механізмів такого впливу є зниження протиерозійної та водорегулювальної функцій лісів. Ослаблення деревостанів під впливом комплексу біотичних чинників супроводжується зрідженням насаджень і зменшенням щільності крон, що призводить до зниження здатності лісів затримувати поверхневий стік і захищати ґрунт від ерозії. У результаті цього в прилеглих агроландшафтах посилюються процеси як водної, так і вітрової ерозії. Аналогічні закономірності взаємозв'язку між станом рослинного покриву та ерозійними процесами відзначено в українських дослідженнях [4, 5]. Узагальнені міжнародні оцінки також підтверджують ці висновки: за даними FAO [10], деградаційні процеси у лісових екосистемах супроводжуються зниженням екосистемних послуг, зокрема регулювання водного режиму та захисту ґрунтів.

Важливим елементом стабілізації агроландшафтів є позахисні лісосмуги, функціональний стан яких безпосередньо впливає на інтенсивність дефляційних процесів. Зниження їхньої ефективності як вітрозахисного бар'єра супроводжується посиленням дефляції, що відповідає положенням агролісомеліорації щодо ролі лісових насаджень у регулюванні мікроклімату та захисті ґрунтів [21]. Таким чином, деградація лісосмуг виступає одним із чинників дестабілізації агроекосистем.

Порушення водорегулювальної функції лісів проявляється у зміні гідрологічного режиму, що доповнює виявлені процеси деградації та посилює їх вплив на прилеглі агроландшафти через збільшення поверхневого стоку і змив родючого шару ґрунту. Такі зміни також узгоджуються з оцінками міжнародних організацій, згідно з якими де-

градація лісових екосистем супроводжується зниженням екосистемних послуг і негативно впливає на продуктивність та стійкість прилеглих земель [10].

У цьому контексті лісові насадження за умов збереженого функціонального стану виконують роль буферного елемента, що забезпечує стабілізацію водного режиму ландшафтів. Водночас їх деградація призводить до екологічних наслідків, зокрема зниження біорізноманіття, змін мікрокліматичних умов і зменшення депонування вуглецю, що впливає на функціонування агроекосистем. Отримані результати також відповідають сучасним дослідженням щодо всихання ясеня в Європі, де *Hymenoscaphus fraxineus* розглядається як ключовий фактор деградації деревостанів [7, 20], що опосередковано впливає на стабільність лісових компонентів агроландшафтів. У межах концепції екосистемних послуг ці процеси інтерпретуються як зниження регулювальних і підтримувальних функцій ландшафтів [23, 24].

Таким чином, виявлені зміни можна розглядати як взаємопов'язані процеси, що потребують системного аналізу. Інтерпретація отриманих результатів у межах DPSIR-підходу дозволяє розглядати виявлені процеси в межах єдиної аналітичної моделі. Причинно-наслідковий ланцюг $P \rightarrow S \rightarrow I$ відображає трансформацію біотичного тиску в зміни стану лісових екосистем і їх подальший вплив на прилеглі агроландшафти, що відповідає принципам DPSIR-підходу до аналізу складних екологічних систем [13].

У практичному вимірі результати дослідження можуть бути використані для обґрунтування управлінських рішень у сфері лісокористування та агролісомеліорації. Зокрема, підтримання оптимальної участі стійких порід у складі насаджень і своєчасне проведення рубок догляду спрямовані на підвищення стійкості деревостанів [7, 16], тоді як інтеграція моніторингу санітарного стану лісів у систему оцінювання агроландшафтів може використовуватися як інструмент ранньої діагностики екологічних ризиків, зокрема ерозійних процесів [4, 5, 23].

Перспективним напрямом є також виявлення та розмноження дерев, потенційно стійких до халарового некрозу. Наявність генетичної варіабельності стійкості *Fraxinus excelsior* до *Hymenochaeta fraxinea* створює передумови для селекційних програм [25], що відповідає сучасним підходам до управління деградаційними процесами [18].

Відновлення пожегозахисних лісових смуг, ослаблених біотичними чинниками, розглядається як складова ґрунтозахисної стратегії [21], тоді як принципи сталого управління лісами [27] забезпечують узгод-

ження природоохоронних і господарських заходів у межах ландшафтних систем.

Отримані результати мають переважно якісний характер і базуються на узагальненні емпіричних даних, що обмежує можливість кількісної оцінки сили та масштабів виявлених взаємозв'язків. Слід також враховувати, що використані дані отримані у різні роки, що може впливати на їх порівнянність. Крім того, відсутність уніфікованої статистичної бази для одночасного аналізу лісових і агроландшафтних показників ускладнює кількісну інтеграцію компонентів DPSIR.

Висновки

Узагальнено деградаційні процеси у лісових екосистемах Лівобережного Лісостепу України та проаналізовано їх зв'язок із екологічним станом прилеглих агроландшафтів у межах DPSIR-підходу. Запропоновано підхід до інтерпретації санітарного стану деревостанів як інтегрального індикатора цих змін.

Показано, що біотичний тиск, зумовлений дією комплексу шкідників і патогенів, пов'язаний із погіршенням санітарного стану ясеневих деревостанів і зниженням їх екологічних функцій. Встановлено, що ці зміни супроводжуються послабленням протиерозійної та водорегулювальної ролі лісів та інтенсифікацією ерозійних процесів у прилеглих агроландшафтах.

Інтерпретація результатів у межах DPSIR-підходу дозволяє розглядати виявлені процеси як причинно-наслідковий ланцюг $P \rightarrow$

$S \rightarrow I$, що відображає трансформацію біотичного тиску в зміни стану екосистем і їх подальший вплив на агроландшафти.

Практичне значення результатів полягає у використанні показників санітарного стану лісів у системах екологічного моніторингу як індикаторів раннього виявлення ризиків деградації агроландшафтів і обґрунтування заходів лісокористування та агролісомеліорації, зокрема відновлення пожегозахисних лісових смуг і підвищення стійкості насаджень.

Результати уточнюють причинно-наслідковий зв'язок деградації лісових екосистем і екологічних змін агроландшафтів у межах DPSIR-підходу. Подальші дослідження доцільно спрямувати на кількісне оцінювання взаємозв'язків між деградацією лісових екосистем і ерозійними процесами з використанням формалізованих моделей і уніфікованих даних.

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

Під час підготовки рукопису автори використовували інструменти штучного інтелекту (ChatGPT, OpenAI) виключно для технічної та мовностилістичної підтримки тексту, структурування окремих фрагментів рукопису та перевірки академічного стилю викладу.

Усі наукові положення, аналітичні висновки, інтерпретація результатів, розрахунки та остаточна редакція статті виконані авторами самостійно. Автори несуть повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаної літератури

1. Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and human well-being: wetlands and water*. Washington: World Resources Institute, 2005. URL: <https://www.wri.org/research/millennium-ecosystem-assessment-ecosystems-and-human-well-being>
2. Bonan G. B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*. 2008. Vol. 320, No. 5882. P. 1444–1449. <https://doi.org/10.1126/science.1155121>
3. Global forest resources assessment 2020: main report / ed. A. Sarre. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020. URL: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/9f24d451-2e56-4ae2-8a4a-1bc511f5e60e/content>

4. Bulygin S., Antonyuk D. Soil erosion in Ukraine. *Науковий вісник НУБіП України. Серія: Агрономія*. 2016. № 235. С. 143–151. URL: https://agriculturalscience.com.ua/web/uploads/journals_pdf/Visnik_Agronomy_2016_235.pdf
5. Тараріко О. Г., Ільєнко Т. В., Кучма Т. Л., Білокінь О. А. Ерозія ґрунтів як чинник опустелювання агроландшафтів України. *Агроекологічний журнал*. 2021. № 3. С. 6–16. URL: <https://journalagroeco.org.ua/issue/view/14494>
6. Flower C. E., Knight K. S., Rebeck J., Gonzalez-Meler M. A. The relationship between the emerald ash borer (*Agrilus planipennis*) and ash (*Fraxinus spp.*) tree decline. *Forest Ecology and Management*. 2013. Vol. 303. P. 143–147. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.04.017>
7. Enderle R., Stenlid J., Vasaitis R. An overview of ash (*Fraxinus spp.*) and the ash dieback disease in Europe. *CAB Reviews*. 2019. Vol. 14, No. 25. P. 1–12. <https://doi.org/10.1079/PAVSNR201914025>
8. Meshkova V., Samoday V., Davydenko K. Ash dieback and contributing factors of forest weakening in provenance tests in the Sumy region. *Central European Forestry Journal*. 2021. Vol. 67, No. 2. P. 113–121. <https://doi.org/10.2478/forj-2021-0001>
9. Schei F. H., Amberg M. P., Grytnes J. A., Johanesen M. S., Johansen J., Milford A. B., Tollefsrud M. M. Ash dieback: a cascade of ecological effects in the ground flora. *Forest Ecology and Management*. 2024. Vol. 572. Art. 122322. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122322>
10. FAO, UNEP. *The state of the world's forests 2020: forests, biodiversity and people*. Rome: FAO, 2020. 214 p. <https://doi.org/10.4060/ca8642en>
11. Крутякова В., Гулич О., Янєс Л. Застосування біологічного методу для захисту лісу і лісових насаджень в Україні. *Вісник аграрної науки*. 2020. Т. 98, № 1. С. 39–46. URL: https://agrovisnyk.com/pdf/ua_2020_01_06.pdf
12. Букша І. Стан оцінювання загроз та адаптаційних заходів у лісовому господарстві України у зв'язку зі зміною клімату. Київ, 2022. 38 с. URL: https://www.sfi-ukraine.org.ua/wp-content/uploads/2023/11/buksha_climate-change_report_31-01-2022-ukr.pdf
13. Smeets E., Weterings R. *Environmental indicators: typology and overview*. Copenhagen: European Environment Agency, 1999. 19 p. URL: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/tec25>
14. Davydenko K., Meshkova V. The current situation concerning severity and causes of ash dieback in Ukraine caused by *Hymenoscyphus fraxineus*. In: Vasaitis R., Enderle R. (ed.). *Dieback of European ash (Fraxinus spp.): consequences and guidelines for sustainable management*. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences, 2017. P. 200–208. URL: https://www.researchgate.net/publication/315670555_The_current_situation_concerning_severity_and_causes_of_ash_dieback_in_Ukraine_caused_by_Hymenoscyphus_fraxineus
15. Методичні вказівки з нагляду, обліку та прогнозування поширення шкідників і хвороб лісу для рівнинної частини України / за ред. В. Л. Мешкової. Харків: Нове слово, 2020. 90 с. URL: https://urifm.org.ua/static/main/files/method_naglyad_oblik_prognoz_.pdf
16. Мешкова В. Л., Борисова В. Л., Криштоп С. А. *Санітарний стан ясени звичайного у Лівобережному Лісостепу України*: монографія. Харків : Факт, 2025. 173 с.
17. Kowalski T. *Chalara fraxinea* sp. nov. associated with dieback of ash. *Forest Pathology*. 2006. Vol. 36, No. 4. P. 264–270. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.2006.00453.x>
18. Vasaitis R., Enderle R. (ed.). *Dieback of European ash (Fraxinus spp.): consequences and guidelines for sustainable management*. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences, 2017. 299 p. URL: https://www.cost.eu/uploads/2018/07/European_Ash_Consequences_and_Guidelines_for_Sustainable_Management.pdf
19. Timmermann V., Børja I., Hietala A. M., Kirisits T., Solheim H. Ash dieback: pathogen spread and ascospore dispersal. *EPPO Bulletin*. 2011. Vol. 41, No. 1. P. 14–20. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2338.2010.02429.x>
20. Pautasso M., Aas G., Queloz V., Holdenrieder O. European ash dieback: a conservation biology challenge. *Biological Conservation*. 2013. Vol. 158. P. 37–49. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.08.026>
21. Jose S. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits. *Agroforestry Systems*. 2009. Vol. 76, No. 1. P. 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9229-7>
22. Mitchell R. J., Beaton J. K., Bellamy P. E., Broome A., Chetcuti J., Eaton S., Woodward S. Ash dieback in the UK: ecological implications and management. *Biological Conservation*. 2014. Vol. 175. P. 95–109. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.04.019>
23. Haines-Young R., Potschin M. *Common international classification of ecosystem services (CICES V5.1)* Revision of the Common International Classification for Ecosystem Services (CICES V5.1): A Policy Brief. *One Ecosystem* 3. E27108 <https://doi.org/10.3897/oneeco.3.e27108>
24. Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Washington : World Resources Institute, 2005. URL: <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>
25. McKinney L. V., Nielsen L. R., Collinge D. B., Thomsen I. M., Hansen J. K., Kjær E. D. The ash dieback crisis: genetic variation in resistance. *Plant Pathology*. 2014. Vol. 63, No. 3. P. 485–499. <https://doi.org/10.1111/ppa.12196>
26. Skovsgaard J. P., Thomsen I. M., Skovsgaard I. M., Martinussen T. Associations among symptoms of dieback in ash stands. *Forest Pathology*. 2010. Vol. 40. P. 7–18. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.2009.00599.x>
27. Rametsteiner E., Simula M. Forest certification as a tool for sustainable forest management. *Journal of Environmental Management*. 2003. Vol. 67, No. 1. P. 87–98. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-4797\(02\)00191-3](https://doi.org/10.1016/S0301-4797(02)00191-3)

Отримано:03.04.2026 / Переглянуто: 05.05.2026 / Прийнято: 10.05.2026 / Опубліковано:30.05.2026

V. L. BORYSOVA¹, PhD (Agriculture),
Lecturer of the Department of Forestry and Game Management,
e-mail: borisova.valentina@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6915-1681>

Y. A. KRYSHTOP, PhD (Agriculture),
Associate Professor Department of Ecology and Biotechnology in Plant Production,
e-mail: kafagroeco@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2868-3101>

V. V. NAZARENKO, PhD (Agriculture),
Associate Professor of the Department of Forest Cultures, Land Reclamation and Landscape Architecture,
e-mail: 0997301084@btu.kharkiv.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1043-1619>

¹State Biotechnology University,
44, Alchevskykh Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

DEGRADATION OF FOREST ECOSYSTEMS IN THE LEFT-BANK FOREST-STEPPE OF UKRAINE AND IMPACT ON AGRICULTURAL LANDSCAPES: DPSIR APPROACH

Purpose. An analytical synthesis of degradation processes in forest ecosystems of the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine and examines their relationship with the ecological condition of adjacent agricultural landscapes using the DPSIR framework.

Methods. The DPSIR approach (EEA, 1999) was used as a conceptual framework to structure cause-and-effect relationships; methods of systematization and generalization of biotic pressure factors based on forest pathology survey data were applied, along with a comparative analysis of scientific sources.

Results. The empirical basis comprises data from surveys of more than 5,000 common ash trees (*Fraxinus excelsior* L.), conducted over multiple years (mainly in the 2010s) across 52 permanent and 125 temporary sample plots in stands of seven forest enterprises. Methodological approaches to forest pathology monitoring in the plain regions of Ukraine were used to substantiate management measures. The main biotic pressure factors were systematized, including stem pests, defoliating insects, pathogenic fungi, and bacterial diseases, whose interaction is characterized as complex (synergistic). A causal chain $P \rightarrow S \rightarrow I$ was identified. The decline in erosion-control and water-regulating functions of degraded forest ecosystems is consistent with the deterioration of soil properties and a decrease in soil fertility; the intensification of erosion processes in adjacent agricultural landscapes is consistent with findings reported in the scientific literature.

Conclusions. The sanitary condition of ash stands is regarded as an integral indicator of forest ecosystem degradation and an early marker of environmental risks for agricultural landscapes. The scientific novelty lies in the formalization of cause-and-effect relationships between biotic factors of ash stand degradation and ecological changes in adjacent agricultural landscapes within the DPSIR framework, as well as in the use of the sanitary condition of stands as an integral indicator of these processes.

KEYWORDS: ash dieback, *Fraxinus excelsior*, forest stand sanitary condition, soil erosion, biotic pressure, forest degradation, DPSIR

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 the preparation of the manuscript, the authors used artificial intelligence tools (ChatGPT, OpenAI) exclusively for technical and linguistic-stylistic support of the text, structuring individual fragments of the manuscript and checking the academic style of presentation.

All scientific statements, analytical conclusions, interpretation of results, calculations and final editing of the article were made by the authors independently. The authors bear full responsibility for the content of the publication.

References

1. Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: Wetlands and water*. World Resources Institute. Retrieved from <https://www.wri.org/research/millennium-ecosystem-assessment-ecosystems-and-human-well-being>
2. Bonan, G. B. (2008). Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320(5882), 1444–1449. <https://doi.org/10.1126/science.1155121>
3. Sarre, A. (Ed.). (2020). *Global forest resources assessment 2020: Main report*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved from <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/9f24d451-2e56-4ae2-8a4a-1bc511f5e60e/content>

4. Bulygin, S., & Antonyuk, D. (2016). Soil erosion in Ukraine. *Naukovyi visnyk NUBiP Ukrainy. Seriya: Ahronomiia*, 235, 143–151. Retrieved from https://agriculturalscience.com.ua/web/uploads/journals_pdf/Visnyk_Agronomy_2016_235.pdf
5. Tarariko, O. H., Iliencko, T. V., Kuchma, T. L., & Bilokin, O. A. (2021). Soil erosion as a factor of agricultural landscape desertification in Ukraine. *Agroecological Journal*, (3), 6–16. Retrieved from <https://journalagroeco.org.ua/issue/view/14494>
6. Flower, C. E., Knight, K. S., Rebbeck, J., & Gonzalez-Meler, M. A. (2013). The relationship between the emerald ash borer (*Agilus planipennis*) and ash (*Fraxinus* spp.) tree decline. *Forest Ecology and Management*, 303, 143–147. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.04.017>
7. Enderle, R., Stenlid, J., & Vasaitis, R. (2019). An overview of ash (*Fraxinus* spp.) and the ash dieback disease in Europe. *CAB Reviews*, 14(25), 1–12. <https://doi.org/10.1079/PAVSNR201914025>
8. Meshkova, V., Samoday, V., & Davydenko, K. (2021). Ash dieback and contributing factors of forest weakening in provenance tests in the Sumy region. *Central European Forestry Journal*, 67(2), 113–121. <https://doi.org/10.2478/forj-2021-0001>
9. Schei, F. H., Arnberg, M. P., Grytnes, J. A., Johanesen, M. S., Johansen, J., Milford, A. B., & Tollefsrud, M. M. (2024). Ash dieback: A cascade of ecological effects in the ground flora. *Forest Ecology and Management*, 572, 122322. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122322>
10. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), & United Nations Environment Programme (UNEP). (2020). *The state of the world's forests 2020: Forests, biodiversity and people*. FAO. <https://doi.org/10.4060/ca8642en>
11. Krutiakova, V., Hulych, O., & Yanse, L. (2020). Application of biological method for forest protection in Ukraine. *Bulletin of Agricultural Science*, 98(1), 39–46. https://agrovisnyk.com/pdf/ua_2020_01_06.pdf
12. Buksha, I. (2022). Assessment of threats and adaptation measures in Ukrainian forestry in relation to climate change. Retrieved from https://www.sfi-ukraine.org.ua/wp-content/uploads/2023/11/buksha_climate-change_report_31-01-2022-ukr.pdf
13. Smeets, E., & Weterings, R. (1999). *Environmental indicators: Typology and overview* (EEA Technical Report No. 25). European Environment Agency. Retrieved from <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/tec25>
14. Davydenko, K., & Meshkova, V. (2017). The current situation concerning severity and causes of ash dieback in Ukraine caused by *Hymenoscyphus fraxineus*. In R. Vasaitis & R. Enderle (Eds.), *Dieback of European ash (Fraxinus spp.): Consequences and guidelines for sustainable management* (pp. 200–208). Swedish University of Agricultural Sciences. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/315670555_The_current_situation_concerning_severity_and_causes_of_ash_dieback_in_Ukraine_caused_by_Hymenoscyphus_fraxineus
15. Meshkova, V. L. (Ed.). (2020). Guidelines for monitoring and forecasting forest pests and diseases. Nove slovo. Retrieved from https://uriffm.org.ua/static/main/files/method_naglyad_oblik_prognoz_.pdf
16. Meshkova, V. L., Borysova, V. L., & Kryshtop, Y. A. (2025). Sanitary condition of common ash in the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine. Fakt.
17. Kowalski, T. (2006). *Chalara fraxinea* sp. nov. associated with dieback of ash. *Forest Pathology*, 36(4), 264–270. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.2006.00453.x>
18. Vasaitis, R., & Enderle, R. (Eds.). (2017). *Dieback of European ash (Fraxinus spp.): Consequences and guidelines for sustainable management*. Swedish University of Agricultural Sciences. Retrieved from https://www.cost.eu/uploads/2018/07/European_Ash_Consequences_and_Guidelines_for_Sustainable_Management.pdf
19. Timmermann, V., Børja, I., Hietala, A. M., Kirisits, T., & Solheim, H. (2011). Ash dieback: Pathogen spread and ascospore dispersal. *EPPO Bulletin*, 41(1), 14–20. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2338.2010.02429.x>
20. Pautasso, M., Aas, G., Queloz, V., & Holdenrieder, O. (2013). European ash dieback: A conservation biology challenge. *Biological Conservation*, 158, 37–49. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.08.026>
21. Jose, S. (2009). Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits. *Agroforestry Systems*, 76(1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9229-7>
22. Mitchell, R. J., Beaton, J. K., Bellamy, P. E., Broome, A., Chetcuti, J., Eaton, S., & Woodward, S. (2014). Ash dieback in the UK: Ecological implications and management. *Biological Conservation*, 175, 95–109. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.04.019>
23. Haines-Young, R., & Potschin, M. (2018). Revision of the Common International Classification for Ecosystem Services (CICES V5.1): A Policy Brief. *One Ecosystem* 3. E27108 <https://doi.org/10.3897/oneeco.3.e27108>
24. Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: Synthesis*. World Resources Institute. Retrieved from <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>
25. McKinney, L. V., Nielsen, L. R., Collinge, D. B., Thomsen, I. M., Hansen, J. K., & Kjær, E. D. (2014). The ash dieback crisis: Genetic variation in resistance. *Plant Pathology*, 63(3), 485–499. <https://doi.org/10.1111/ppa.12196>
26. Skovsgaard, J. P., Thomsen, I. M., Skovsgaard, I. M., & Martinussen, T. (2010). Associations among symptoms of dieback in ash stands. *Forest Pathology*, 40, 7–18. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.2009.00599.x>
27. Rametsteiner, E., & Simula, M. (2003). Forest certification as a tool for sustainable forest management. *Journal of Environmental Management*, 67(1), 87–98. [https://doi.org/10.1016/S0301-4797\(02\)00191-3](https://doi.org/10.1016/S0301-4797(02)00191-3)

Submission received: 03.04.2026 / Revised: 05.05.2026 / Accepted: 10.05.2026 / Published: 30.05.2026

<https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-15>

УДК (UDC): 528.8:004.9:631.15

А. Г. КОТ¹,

аспірант кафедри екології та менеджменту довкілля

e-mail: anna.kot@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4700-2620>

О. М. НЕМОШКАЛОВ¹,

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*

ЗАСТОСУВАННЯ СЕРВІСУ GOOGLE EARTH ENGINE ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ АГРОЛАНДШАФТІВ

Безпрецедентна деградація ґрунтового покриву України внаслідок збройної агресії РФ ускладнюється тривалими процесами водної та вітрової ерозії. Традиційні методи обстеження територій наразі обмежені через мінну небезпеку, що робить дистанційне зондування Землі ключовим інструментом екологічної оцінки.

Мета. Практичне використання Google Earth Engine для оцінки впливу еродованості ґрунтів та їх забруднення важкими металами на стан рослинності.

Методи. Дослідження ґрунтується на фітоіндикаційному підході з використанням мультиспектральних даних супутника Sentinel-2.

Результати. Експериментальні дослідження здійснювалися протягом 2024-2025 рр. на базі двох репрезентативних тестових полігонів, розташованих у межах Роганської територіальної громади (Харківський район, Харківська область). Для оцінки стану рослинності (на прикладі соняшнику) застосовано вегетаційні індекси NDVI та NDRE. Обробка великих масивів даних здійснювалася автоматизовано в середовищі GEE на базі двох тестових полігонів у Харківській області. На полігоні №1 проведено порівняльний ретроспективний аналіз зон потенційного забруднення важкими металами (внаслідок бомботурбації) та фонових ділянок. Встановлено, що фітоіндикаційні аномалії можуть мати природне походження, що підкреслює важливість порівняння з довоєнними показниками для коректної оцінки воєнних збитків. На полігоні №2 виявлено чітку кореляцію між ступенем еродованості чорноземів та значеннями індексу NDRE: втрата кожних 10 см генетичного профілю ґрунту корелює зі зниженням індексу на 0,01 одиниці. Розраховано сумарний недобір врожаю через ерозію, який для дослідної ділянки склав понад 650 ц.

Висновки. Доведено високу ефективність індексу NDRE як індикатора вмісту хлорофілу на пізніх етапах вегетації. Результати підтверджують, що інтеграція ГІС-технологій та супутникового моніторингу є безальтернативною основою для розробки стратегій повоєнної ремедіації земель та впровадження систем точного землеробства.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: земельні ресурси, дистанційне зондування землі, Google Earth Engine, Sentinel-2, вегетаційний індекс, NDRE, ерозія ґрунту, мілітарна деградація

Як цитувати: Кот А. Г., Немошкалов О. М. Застосування сервісу Google Earth Engine для дослідження стану агроландшафтів. *Проблеми неоекології*. 2026. Вип. 45. С. 199–212. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-15>

In cites: Kot, A. G., & Nemoshkalov, O.M. (2026), Application of the Google Earth Engine platform for the study of agricultural landscape conditions. *Man and Environment. Issues of Neoeology*, (45), 199–212. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-15> (in Ukrainian)

Вступ

Земельні ресурси становлять стратегічне національне багатство України, яке потребує системного підходу до бережливого використання, охорони та відновлення.

Проте стан земельного фонду країни ще до початку активних бойових дій характеризувався розвитком інтенсивних процесів деградації, насамперед водною та вітровою

ерозією, що призводило до втрати родючості та погіршення структури ґрунтового покриву [1].

Ерозія ґрунтів є одним із наймасштабніших факторів фізичної деградації земель, що становить пряму загрозу глобальній продовольчій безпеці. За світовими оцінками, близько 80% земель, придатних для землеробства, вже тією чи іншою мірою зазнали помірного або сильного впливу ерозійних процесів. В Україні масштаби деградації набувають критичного характеру: площа ерозійно небезпечних земель сягає майже 18 млн га, з яких 13 млн га загрожує водна ерозія, а 5 млн га - вітрова. Економічні та екологічні наслідки цього явища колосальні. Зокрема, на виробництво 1 т продукції рослинництва (в умовному зерні) втрачається близько 7 т ґрунту, що призводить до мільярдних економічних збитків [2, 3].

Ерозія ґрунтів наразі виступає домінуючим чинником фізичної деградації земельних ресурсів, що безпосередньо загрожує стійкості глобальних продовольчих систем. Згідно з актуальними оцінками FAO, понад 80% світового рілля піддається помірному або сильному впливу деструктивних процесів. В Україні цей виклик набуває ознак національної екологічної кризи: загальна площа ерозійно небезпечних угідь перевищила поріг у 18 млн га. Зокрема, динаміка водної ерозії охоплює 13 млн га, тоді як вітрова (дефляція) активно загрожує ще 5 млн га [2, 4].

Економічний вимір деградації ґрунтового покриву є критичним: встановлено кореляцію, за якої виробництво 1 т сільськогосподарської продукції (у зерновому еквіваленті) супроводжується незворотною втратою близько 7 т родючого шару. Такі темпи призводять не лише до мільярдних прямих економічних збитків, а й до виснаження природного капіталу країни.

В умовах воєнного стану ситуація ускладнюється антропогенно-мілітарним впливом. Утворення вирв від обстрілів, порушення цілісності дернового шару важкою технікою та знищення лісосмуг стають тригерами нових ерозійних осередків, що потребує інтеграції методів ГІС-моніторингу та дистанційного зондування для оперативного оцінювання стану земель [5, 6].

Збройна агресія російської федерації проти України спричинила безпрецедентну в сучасній історії мілітарну деградацію ґрунтового покриву, перетворивши територію

держави на одну з найбільш забруднених боєприпасами у світі [7, 8]. Оскільки понад 15-21 мільйон гектарів українських земель, переважно чорноземів, опинилися під впливом активних бойових дій, масштабна деградація ґрунтових ресурсів становить пряму загрозу екологічній стабільності та глобальній продовольчій безпеці [9-11]. Особливу небезпеку становить хімічне забруднення потенційно токсичними елементами, насамперед важкими металами (Pb, Cd, Hg, Cu, Zn, Ni, Sb), що вивільняються внаслідок детонації снарядів, мін і ракет, а також піролізу знищеної військової техніки [12-14]. Ці забруднювачі є персистентними, не піддаються біологічному розкладанню, пригнічують мікробіоту ґрунту та мають здатність до біоаккумуляції в трофічних ланцюгах «рослина – тварина – людина», при цьому період їхнього природного самоочищення може тривати від сотень до кількох тисяч років [15, 16].

В умовах триваючого конфлікту, мінної небезпеки та обмеженого доступу до територій, дослідження еколого-геохімічного стану мілітарних агроландшафтів із впровадженням інноваційних методів дистанційного зондування та ГІС-технологій є критично важливим для оперативної оцінки шкоди, прогнозування міграції токсикантів і наукового обґрунтування стратегій повоєнної ремедіації земель.

У таких складних умовах традиційні методи моніторингу, засновані на точковому польовому відборі зразків, виявляються надто вартісними, тривалими у часі та часто небезпечними або неможливими для реалізації на великих площах.

Використання технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) відкриває нові можливості для оперативного та неруйнівного контролю стану земель. Особливе місце серед сучасних інструментів посідає хмарна платформа Google Earth Engine (GEE). Її ключовими перевагами є вільний доступ до багаторічних архівів супутникових даних (Sentinel, Landsat), висока швидкість опрацювання колосальних масивів інформації без використання локальних обчислювальних потужностей та можливість проведення точного ретроспективного аналізу стану рослинності та ґрунтів [17].

Мета – практичне використання GEE для оцінки впливу еродованості ґрунтів та їх забруднення важкими металами на стан рослинності.

Методи дослідження

Експериментальні дослідження здійснювалися протягом 2024-2025 рр. на базі двох репрезентативних тестових полігонів, розташованих у межах Роганської територіальної громади (Харківський район, Харківська область).

Наукова концепція роботи ґрунтується на фітоіндикаційному підході, де рослинний покрив розглядається як природний інтегральний індикатор екологічного стану агроландшафту. Для верифікації стану агроценозів застосовано методи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), що забезпечують високу ефективність та оперативність моніторингу.

Дослідження проводились за двома основними напрямками:

1) Оцінка впливу мілітарного забруднення ґрунтів важкими металами на сільськогосподарську рослинність шляхом дистанційного моніторингу (поле №1, рис.1).

2) Оцінка впливу еродованості ґрунтів на сільськогосподарську рослинність шляхом дистанційного моніторингу (поле №2, рис.1).

У межах наукової співпраці Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна з програмою USAID АГРО використано базу геоданих агровиробничих груп ґрунтів Харківської області.

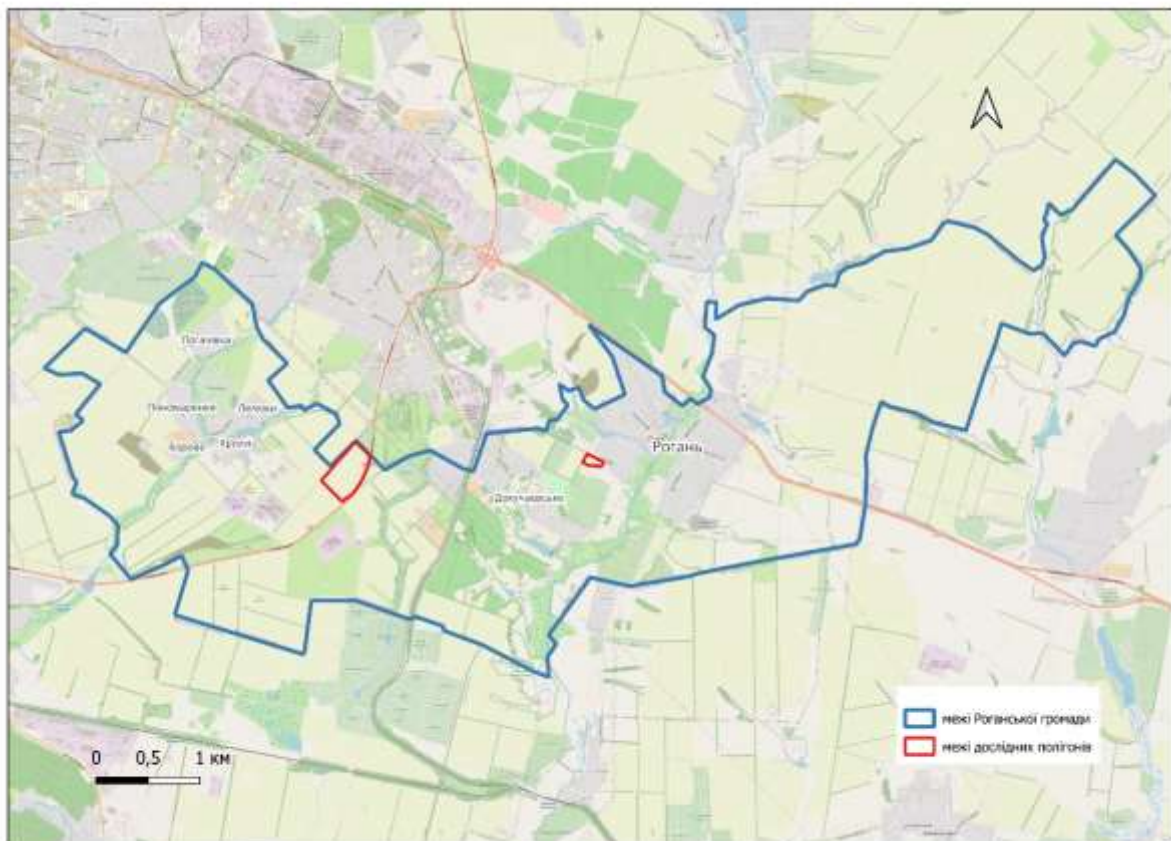


Рис. 1 – Розміщення полігонів дослідження на території Роганської територіальної громади

Fig. 1 – Location of the studied landfills on the territory of the Rohansk territorial community

Згідно з нею загальна площа ґрунтового покриття земель сільськогосподарського призначення в межах Роганської територіальної громади становить 6767,7 га (рис. 2). Шифри агровиробничих груп ґрунтів (рис.2) відпо-

відють «Порядку ведення Державного земельного кадастру» (додатки 2-75 до Порядку) [18].

Аналіз отриманої вибірки свідчить про високе різноманіття ґрунтів території, де

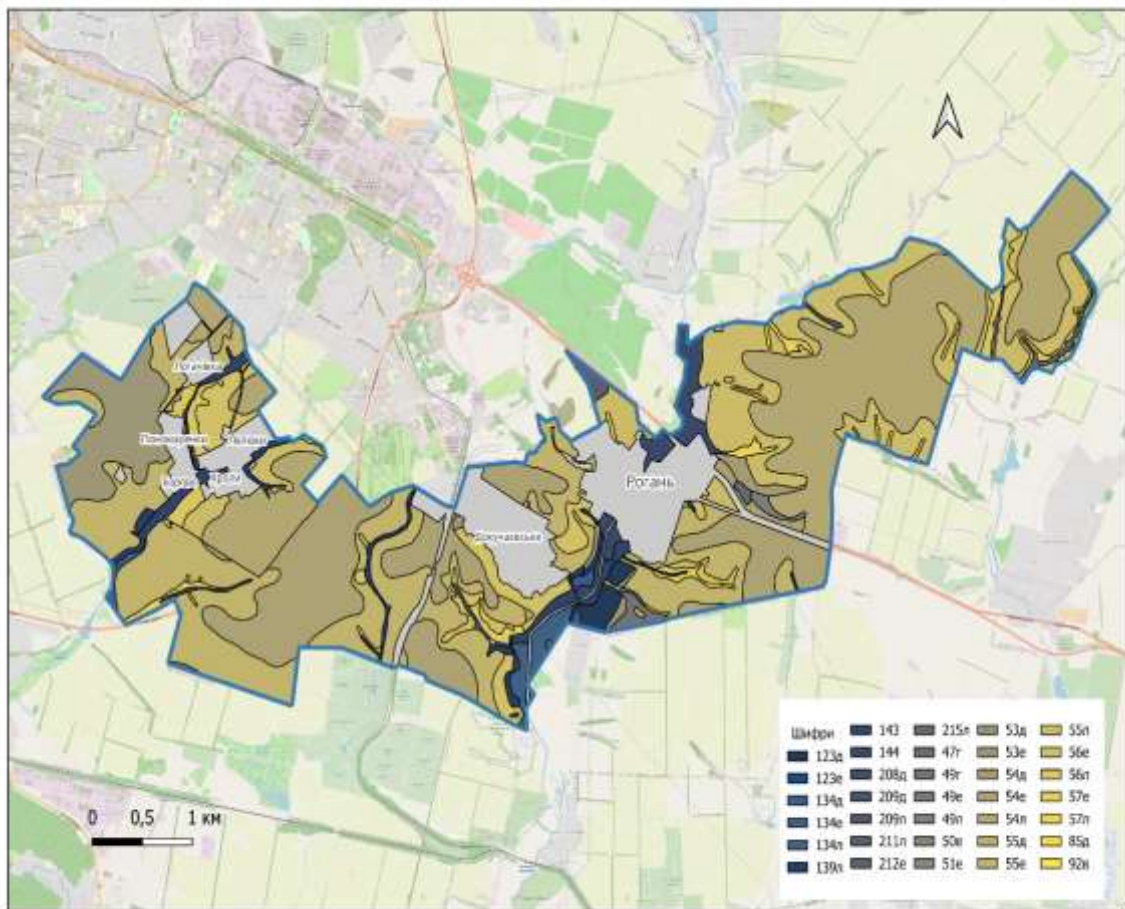


Рис. 2 – Ґрунтовий покрив Роганської територіальної громади

Fig. 2 – Soil cover of the Rohansk territorial community

ідентифіковано 36 різновидів ґрунтів з домінуванням чорноземів типових середньо гумусних важко суглинкових та легко глинистих. Встановлено, що 46% (3109,6 га) загального ґрунтового покриву громади класифікуються як особливо цінні ґрунти [19].

Водночас виявлено значне поширення деградаційних процесів: еродовані ґрунти займають 3090,9 га, що становить 45,7% від загального ґрунтового фонду. Слід зауважити, що використана база геоданих містить інформацію виключно щодо аграрних угідь, тоді як відомості про стан ґрунтового покриву в межах міст, населених пунктів та земель лісового фонду наразі відсутні.

У дослідженнях застосовувались космічні знімки місії Sentinel-2 (програма «Copernicus»), зокрема дані супутників Sentinel-2A та Sentinel-2B. Кожен апарат оснащений мультиспектральним сенсором, що здійснює знімання у 13 діапазонах електромагнітного спектра (Copernicus Data

Space Ecosystem, станом на 8 січня 2026 р.). Доступ до матеріалів отримано за посиланням: <https://dataspace.copernicus.eu/data-collections/copernicus-sentinel-data/sentinel-2>.

Наявність мультиспектральної зйомки дозволяє створювати синтезовані зображення, що відбивають різноманітні вегетаційні індекси зокрема нормалізований відносний індекс вегетації (NDVI) та нормалізований різницевий індекс «червоного краю» (NDRE).

Нормалізований відносний вегетаційний індекс (NDVI) є одним із найбільш вживаних показників для оцінки стану рослинного покриву. Фізичний принцип розрахунку NDVI базується на контрасті між інтенсивним поглинанням сонячної радіації пігментами хлорофілу в червоній зоні спектра (Red) та високим коефіцієнтом розсіювання енергії мезофілом листка в ближній інфрачервоній області (NIR).

Розрахунок індексу здійснюється за формулою:

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red) \quad (1)$$

де:

- NIR - значення відбивної здатності в ближній інфрачервоній області спектра;
- Red - значення відбивної здатності в червоній області спектра.

NDVI змогу кількісно оцінити фотосинтетичну активність та густоту біомаси. Високі значення індексу свідчать про розвинену вегетативну масу та сприятливий фітосанітарний стан, тоді як низькі показники вказують на дефіцит вологи, пошкодження шкідниками або стадію деградації хлоропластів [20]. Проте NDVI має обмеження у вигляді ефекту «насичення»: при досягненні максимальної щільності листового апарату він втрачає чутливість до подальших змін у стані посівів [21].

Результати та обговорення

Активні бойові дії тривали на території громади у березні 2022 року. Дистанційний моніторинг проявів бомботурбації виявив 916 вирв, що створює передумови для забруднення ґрунтів громади важкими металами [22].

Дослідження по оцінці забруднення ґрунтів важкими металами проводились на полігоні №1 загальною площею 53 га (рис. 1). Обстежуване поле постраждало у ході бойо-

Для нівелювання цього недоліку та отримання більш точних даних на пізніх етапах онтогенезу рослин використовується NDRE. Його принципова відмінність полягає у заміні червоного каналу на вузький перехідний діапазон спектра між червоним та ближнім інфрачервоним випромінюванням - Red Edge.

Формула розрахунку набуває вигляду:

$$NDRE = (NIR - RedEdge) / (NIR + RedEdge) \quad (2)$$

Оскільки випромінювання у спектрі Red Edge здатне проникати крізь верхній ярус листя значно глибше, ніж звичайне червоне світло, NDRE забезпечує об'єктивну оцінку вмісту хлорофілу та азоту в усій товщі рослинного покриву [21].

Пошук, розрахунок вегетаційних індексів обробка та їх аналіз проводились автоматично за допомогою сервісу Google Earth Engine.

вих дій, на рис. 3 а наведені вирви, які були зафіксовані в ході дешифрування космічних знімків [22]. Аналіз розташування вирв показує, що від обстрілів переважно постраждала лише центральна частина поля площею 11,3 га. На ній було зафіксовано 92 вирви, отже щільність вирв на ній становить 8,14 шт/га. Ця частина була виділена як потенційно забруднена важкими металами (рис.3б).



а)



б)

Рис. 3 – Виділення потенційно забрудненої та незабрудненої зон на полігоні №1
Fig. 3 – Identification of potentially contaminated and uncontaminated areas at landfill No. 1

Робочою гіпотезою визначено припущення, що на потенційно забрудненій території (рис. 3б, зона 2) розвиток с.-г. рослин буде гіршим ніж у незабрудненій (рис. 3б, зона 1).

За допомогою сервісу «Карта посівів в Україні» визначені агрофони для полігону №1 за останні роки. Встановлено, що у 2019, 2021, 2023 та 2025 роках на цій ділянці вирощувався соняшник, що дозволило порівняти стан ідентичної культури у фоновий період (до початку активних бойових дій) та в умовах наявного мілітарного забруднення.

Оцінювання стану рослин проводилось за вегетаційним індексом NDRE, який є особливо чутливим до вмісту хлорофілу в листі рослин. Розрахунок NDRE проводився на основі даних космічної зйомки супутника Sentinel-2 за допомогою онлайн-сервісу Google Earth Engine. Для автоматизації процесу було розроблено алгоритм, який відбирав усі безхмарні знімки протягом вегетаційного циклу та розраховував індекс окремо

для зон потенційно забруднених і незабруднених ґрунтів, а також формував синтезований усереднений растр за рік. Результати аналізу представлені у таблиці 1.

Згідно з робочою гіпотезою, середньорічні значення NDRE на забрудненій території (NDRE_{з.т.}) мають бути нижчими за відповідні показники на незабрудненій ділянці (NDRE_{н.т.}), а різниця між ними (Delta NDRE*100) повинна бути від'ємною, що свідчатиме про токсичний вплив на рослини

Другий етап наукової роботи присвячений вивченню впливу еродованості ґрунтів на стан сільськогосподарських культур у межах полігону №2. Основним діагностичним показником виступав нормалізований відносний вегетаційний індекс (NDVI). Обчислення індексу здійснювалося на основі мультиспектральних даних супутника Sentinel-2 із використанням інструментарію хмарної платформи Google Earth Engine.

Таблиця 1

Результати розрахунку індексу NDRE для полігону №1

Table 1

Results of the NDRE index calculation for polygon No. 1

Рік /Year	С.-г. культура / Agricultural culture	NDRE _{з.т.} / contaminated area	NDRE _{н.т.} / uncontaminated area	Delta NDRE*100
2019	Соняшник / Sunflower	0,328	0,337	-0,922
2021	Соняшник / Sunflower	0,341	0,345	-0,378
2023	Соняшник / Sunflower	0,378	0,383	-0,515
2025	Соняшник / Sunflower	0,346	0,352	-0,624

У ході верифікації наявних картографічних матеріалів було встановлено необхідність актуалізації архівної ґрунтової карти дослідної ділянки. Порівняльний аналіз із серією актуальних космічних знімків виявив суттєві невідповідності меж еродованих угідь (рис. 4а). Результати дешифрування даних сервісу Google Earth свідчать про значну трансформацію контурів деградованих ділянок та інтенсифікацію процесів ерозії порівняно з ретроспективними даними. На основі отриманих результатів було розроблено оновлену карту агропромислових груп ґрунтів полігону (рис. 4б).

Для подальшої аналітичної обробки даних у середовищі хмарної платформи Google Earth Engine було розроблено спеці-

алізований алгоритм, призначений для розрахунку середньозважених значень вегетаційного індексу NDRE. Обчислення проводилися диференційовано для кожного ґрунтового виділу відповідно до актуалізованої картосхеми агропромислових груп ґрунтів (рис. 4б) протягом вегетаційного періоду 2025 року. Отримані кількісні характеристики систематизовано та наведено у табл. 2.

Результати дистанційного моніторингу стану сільськогосподарської рослинності на тестовому полігоні №1 свідчать про стаке зниження значень вегетаційного індексу NDRE на ділянках потенційного мілітарного забруднення порівняно з контрольними (фоновими) зонами (табл. 1). Високий ступінь достовірності отриманих даних зу-



а) архівна карта



б) оновлена карта

Шифр агрогруп: 54е Черноземи типові середньогумусні важкосуглинкові;
55е Черноземи типові і черноземи сильнореградовані слабозмиті важкосуглинкові; 56е Черно-
ноземи типові і черноземи сильнореградовані середньозмиті важкосуглинкові

Рис. 4 – Оновлення карти агровиробничих груп ґрунтів полігона №2

Agrogroup code: 54e Typical chernozems, medium humus heavy loam;

55e Typical chernozems and strongly degraded chernozems, slightly washed out heavy loam;

56e Typical chernozems and strongly degraded chernozems, medium washed out heavy loam)

Fig. 4 – Updating the map of agricultural production groups of soils of polygon No. 2

Таблиця 2

Результати розрахунку індексу NDRE для полігону №2

Table 2

Calculation results of NDRE index for polygon #2

Знімок /Snapshot	Дата / Date	Середнє / Average NDRE 54e	Середнє / Average NDRE 55e	Середнє / Average NDRE 56e
20250420T083559_20250420T083901_T36UYA	20,04,2025	0,27	0,26	0,26
20250420T083559_20250420T083901_T37UCR	20,04,2025	0,27	0,26	0,26
20250425T083621_20250425T083621_T36UYA	25,04,2025	0,29	0,25	0,25
20250425T083621_20250425T083621_T37UCR	25,04,2025	0,29	0,25	0,24
20250606T084501_20250606T084457_T36UYA	06,06,2025	0,36	0,23	0,26
20250606T084501_20250606T084457_T37UCR	06,06,2025	0,36	0,23	0,26
20250609T083559_20250609T084325_T36UYA	09,06,2025	0,35	0,23	0,25
20250609T083559_20250609T084325_T37UCR	09,06,2025	0,35	0,23	0,25
20250624T083621_20250624T084314_T36UYA	24,06,2025	0,32	0,29	0,3
20250706T083741_20250706T083740_T36UYA	06,07,2025	0,53	0,51	0,47
20250706T083741_20250706T083740_T37UCR	06,07,2025	0,52	0,51	0,47
20250709T083559_20250709T084337_T36UYA	09,07,2025	0,51	0,52	0,47
20250709T083559_20250709T084337_T37UCR	09,07,2025	0,5	0,52	0,47
20250714T083621_20250714T084118_T36UYA	14,07,2025	0,5	0,53	0,48
20250729T083559_20250729T084008_T36UYA	29,07,2025	0,44	0,51	0,46
20250729T083559_20250729T084008_T37UCR	29,07,2025	0,44	0,51	0,46
20250805T084501_20250805T084457_T36UYA	05,08,2025	0,53	0,55	0,51
20250808T083559_20250808T083936_T36UYA	08,08,2025	0,49	0,54	0,51
20250808T083559_20250808T083936_T37UCR	08,08,2025	0,48	0,54	0,51
20250828T083559_20250828T083926_T36UYA	28,08,2025	0,44	0,45	0,42
20250828T083559_20250828T083926_T37UCR	28,08,2025	0,43	0,45	0,41
20250912T083611_20250912T084011_T36UYA	12,09,2025	0,32	0,27	0,26
20250912T083611_20250912T084011_T37UCR	12,09,2025	0,32	0,26	0,26
20250914T084451_20250914T084454_T36UYA	14,09,2025	0,35	0,27	0,26
20250914T084451_20250914T084454_T37UCR	14,09,2025	0,34	0,27	0,26
20250922T083651_20250922T083737_T36UYA	22,09,2025	0,35	0,25	0,24
20250922T083651_20250922T083737_T37UCR	22,09,2025	0,35	0,25	0,23
20251004T084501_20251004T084456_T36UYA	04,10,2025	0,29	0,24	0,22
20251004T084501_20251004T084456_T37UCR	04,10,2025	0,29	0,23	0,22
Середнє за рік		0,39	0,36	0,34

мовлений застосуванням релевантної методологічної схеми: аналіз проводився на посівах ідентичної культури (соняшник) протягом чотирьох часових зрізів, що охоплюють два довоєнні роки (ретроспективний фон) та два роки імпаکتного впливу (період активних бойових дій). За структурою побудови дана модель відповідає параметрам однофакторного польового дослідження з двократною повторністю, що дозволяє мінімізувати вплив випадкових чинників та верифікувати виявлені закономірності.

Численні дослідження підтверджують можливість непрямого моніторингу ВМ у ґрунті, заснованого на аналізі фізіологічних змін у рослинах під впливом токсичного

стресу [23-25]. Рослини акумулюють ВМ, що мігрують із ґрунтового розчину через кореневу систему до вегетативних органів - стебел та листя [23, 26-28]. Накопичення таких елементів, як кадмій (Cd), арсен (As), ртуть (Hg), мідь (Cu), хром (Cr), свинець (Pb), цинк (Zn) та нікель (Ni), ініціює каскад фізіологічних змін. Ці внутрішні трансформації включають пригнічення синтезу хлорофілу, руйнування ультраструктури клітин, інактивацію ферментів та порушення процесів фотосинтезу і транспірації [29]. Оскільки фізіологічний стан рослин безпосередньо корелює з їхніми оптичними властивостями, сенсори ДЗЗ здатні реєструвати ці зміни у

видимому та інфрачервоному діапазонах електромагнітного спектра [30].

Попри теоретичну можливість дистанційної діагностики забруднення ґрунтів за станом фітоценозів, підтверджену аналізом наукової літератури, у межах даного дослідження встановити пряму детермінацію не вдалося. Результати свідчать, що знижені значення індексу NDRE в межах потенційно імпактної зони спостерігалися релевантно як під час воєнних дій, так і в довоєнний період. Це дає підстави стверджувати про наявність сталого фактора впливу на стан рослинності, що має немілітарне походження.

Зважаючи на те, що ґрунтовий покрив полігону №1 є гомогенним і представлений чорноземами типовими середньогумусними важкосуглинковими (агрогрупа 54е), зафіксована просторова неоднорідність не може бути пояснена відмінностями в генезисі ґрунтів. Ідентифікація цих прихованих чинників (мікрорельєф, особливості гідрологічного режиму тощо) є необхідною умовою для методичного обґрунтування алгоритмів точного землеробства та диференційованого управління продуктивністю даного агроландшафту.

Результати досліджень на полігоні №2 підтверджують детермінований зв'язок між ступенем еродованості ґрунтів та рівнем продуктивності агрофітоценозів. Згідно з даними глобального мета-аналізу [31], кумулятивний негативний вплив на врожайність посилюється експоненціально зі збільшення глибини ерозійного зрізу. Якщо втрата верхнього шару до 5 см може нівелюватися буферністю ґрунту, то подальша деградація призводить до нелінійного падіння врожайності: при втраті 5-10 см показник зниження становить -0,34, а при критичній ерозії (20-30 см) сягає -0,99, що робить повне відновлення продуктивності неможливим навіть за інтенсивної хімізації та меліорації [31].

Аналіз середньорічних значень індексу NDRE за 2025 рік (на основі репрезентативної вибірки з 29 супутникових знімків) виявив чітку диференціацію стану посівів залежно від агропромислової групи ґрунтів (табл. 2). Для модальних (незмитих) чорноземів (агрогрупа 54е) середнє значення NDRE становило 0,39,

для слабозмитих (55е) - 0,36, а для середньозмитих (56е) - 0,34. Враховуючи морфологічні особливості, де слабозмиті ґрунти характеризуються зменшенням профілю на 20 см, а середньозмиті - на 40 см, встановлено індикативну залежність: зниження індексу NDRE на кожні 0,01 одиниці корелює з втратою приблизно 10 см глибини генетичного профілю ґрунту.

Аналіз просторової структури ґрунтового покриву полігону №2 свідчить про значну домінацію деградованих ділянок: площа модальних (незмитих) ґрунтів становить лише 0,12 га, тоді як слабозмиті та середньозмиті відміни займають 3 га та 2,21 га відповідно. Для кількісної оцінки впливу ерозії на продуктивність було застосовано методику на основі метрики Тарарико (1983), згідно з якою втрата кожного сантиметра потужності генетичного профілю ґрунту призводить до зниження врожайності на 0,5-2 ц/га.

Враховуючи, що середня врожайність соняшнику в Україні у 2025 році становила 1,83 т/га, та узявши середнє значення метрики Тарарико - 1 ц на 1 см - було проведено розрахунок гіпотетичного валового збору для різних ґрунтових виділів. Зокрема, для незмитих ґрунтів (агрогрупа 54е) цей показник визначено на рівні 21,96 ц, тоді як для слабозмитих (55е) та середньозмитих (56е) ділянок розрахункові значення становлять 489 ц та 316 ц відповідно. Таким чином, сумарний недобор врожаю внаслідок ерозійних процесів на досліджуваному полігоні сягає 659,39 ц (виходячи з різниці між потенційно можливим та фактичним збором).

Отримані дані підкреслюють, що інтенсивність водної ерозії є критичним лімітуючим чинником, який зумовлює нелінійне падіння продуктивності агрофітоценозів. Виявлена кореляція між ступенем змитості ґрунту та значеннями індексу NDRE дозволяє використовувати методи дистанційного зондування як надійний інструмент для прецизійної оцінки економічних збитків та районування територій за ступенем деградації. Це створює методичне підґрунтя для впровадження систем диференційованого внесення добрив і меліорантів з метою часткової компенсації втрат родючості на еродованих землях.

Висновки

Підтверджено ефективність використання хмарної платформи Google Earth Engine (GEE) та мультиспектральних даних Sentinel-2 для моніторингу агроландшафтів в

умовах мілітарного й ерозійного навантаження. Встановлено закономірності просторової неоднорідності рослинного покриву, виявлено зв'язок спектральних індикаторів із

деградацією ґрунтів та обґрунтовано можливість практичного застосування отриманих результатів у системах точного землеробства.

Комплексне дослідження стану агроландшафтів Роганської територіальної громади в умовах мілітарного та ерозійного впливу дозволяє сформулювати низку концептуальних висновків, що мають як теоретичне, так і прикладне значення для сучасної екології та агрономії:

– Підтверджено стратегічну роль хмарної платформи Google Earth Engine (GEE) як безальтернативного інструменту для проведення екологічного моніторингу в умовах збройного конфлікту. Можливість опрацювання колосальних масивів мультиспектральних даних Sentinel-2 без використання локальних обчислювальних потужностей дозволяє нівелювати ризики, пов'язані з мінною небезпекою та обмеженим доступом до територій, а автоматизація розрахунку вегетаційних індексів (NDVI, NDRE) забезпечує високу оперативність отримання результатів, що критично важливо для прийняття управлінських рішень у агросекторі.

– Методологічно доведено необхідність впровадження ретроспективного аналізу при оцінці мілітарної деградації земель: кейс полігону №1 продемонстрував, що фітоіндикаційні аномалії, які можуть трактуватися як наслідок бойового впливу, часто мають фонове походження, зумовлене природною неоднорідністю ґрунтового покриву, що має фундаментальне значення для коректної оцінки воєнних збитків, репарацій і планів рекультивзації.

– Встановлено чітку кількісну залежність між рівнем деградації ґрунту та його спектральною відповіддю: використання ін-

дексу NDRE виявилось більш інформативним порівняно з NDVI на пізніх етапах вегетації соня

шнику, а отримані результати свідчать, що ерозійні процеси є домінуючим чинником зниження родючості, причому втрата кожних 10 см ґрунтового профілю корелює зі зниженням індексу вегетації на 0,01 одиниці, а сумарний недобір урожаю понад 650 ц демонструє масштаб економічних втрат.

– Результати дослідження вказують на необхідність переходу від загальних методів землеробства до прецизійних стратегій відновлення, оскільки дані дистанційного зондування вже можуть слугувати основою для створення карт диференційованого внесення меліорантів і добрив, що забезпечує як економію ресурсів, так і цільове відновлення найбільш деградованих ділянок.

– Результати виходять за межі суто аграрного моніторингу та порушують питання соціальної ціни деградації ландшафтів, адже мінування та фізичне руйнування ґрунтового покриву є складовою ширшої гуманітарної кризи, формуючи потребу в розвитку суміжних напрямів, зокрема біомедичної інженерії та 3D-друку протезів, що дозволяє розглядати повоєнне відновлення у новій парадигмі еко-соціальної реабілітації.

Можна стверджувати, що синергія сучасних ГІС-технологій та класичного ґрунтознавства відкриває шлях до науково обґрунтованого повоєнного відродження України. Подальші дослідження мають бути спрямовані на інтеграцію алгоритмів штучного інтелекту для автоматичного розпізнавання типів мілітарних пошкоджень та розробку цифрових двійників агроландшафтів, що дозволить прогнозувати міграцію важких металів у трофічних ланцюгах і гарантувати безпеку харчової продукції.

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 використовувався штучний інтелект Gemini 3.0 для розробки алгоритму для сервісу Google Earth Engine.

Список використаної літератури

1. Балюк С. А., Кучер А. В., Максименко Н. В. Ґрунтові ресурси України: стан, проблеми та стратегія сталого управління. *Український географічний журнал*. 2021. № 2. С. 3–11. <https://doi.org/10.15407/ugz2021.02.003>

2. Dudiak N., Pichura V., Potravka L., Strachuk N. Environmental and economic effects of water and deflation destruction of steppe soil in Ukraine. *Journal of Water and Land Development*, 2021. (50), 10–26 <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.138156>
3. Bulygin S., Antonyuk D. Soil erosion in Ukraine. *Рослинництво та ґрунтознавство*. 2016. No. 235. 145 – 151. URL: <https://agriculturalscience.com.ua/uk/journals/235-2016>
4. Sartori M., Ferrari E., M'Barek R., et al. Remaining Loyal to Our Soil: A Prospective Integrated Assessment of Soil Erosion on Global Food Security. *Ecological Economics*, 2024. 219, Article 108103. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108103>
5. Kopittke P. M., Menzies N. W., Wang P., et al. Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environment International*, 2019. Vol. 132, Article 105078. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105078>
6. Panagos P., Standardi G., Borrelli P., et al. Cost of agricultural productivity loss due to soil erosion in the European Union. *Land Degradation & Development*, 2018. Vol. 29. No 3. P. 471–484. <https://doi.org/10.1002/ldr.2879>
7. Балюк С. А., Кучер А. В., Солоха М. О. та ін. Вплив збройної агресії та воєнних дій на сучасний стан ґрунтового покриву, оцінка шкоди та збитків, заходи з відновлення: наукова доповідь. 2022. Харків: Бровін. URL: https://www.researchgate.net/publication/367046551_Vpliv_zbrojnoi_agresii_ta_voen-nih_dij_na_sucasnij_stan_gruntovogo_pokrivu_ocinka_skodi_ta_zbitkiv_zahodi_z_vidnovlenna
8. Сплодитель А., Голубцов О., Чумаченко С., Сорокіна Л. Вплив війни росії проти України на стан українських ґрунтів. Київ: ГО «Екодія». 2023. URL: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/zabrudnennia-zemel-vid-rosii2.pdf>
9. 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>
10. Яценко Л., Андрощук О., Василенко Л., Черноіван Ю. Екологічні ризики забруднення важкими металами ґрунтів, постраждалих від війни, в Україні. *Європейський журнал екологічних наук*. 2025. Т.15. № 1. С. 18–27. <https://doi.org/10.14712/23361964.2025.3>
11. Novakovska I., Belousova N., Hunko L. Land degradation in Ukraine as a result of military operations. *Acta Scientiarum Polonorum Administratio Locorum*, 2025. 24(1), 129–145. <https://doi.org/10.31648/aspal.9788>
12. 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. 109–116. <https://doi.org/10.23939/ep2024.02.109>
13. Solokha M., Demyanyuk O., Symochko L., 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>
14. Trokhymenko G., Magas N., Shumilova O., Klochko V. Analysis of surface water quality indicators in the Dniprobug estuary region after the destruction of the Kakhovka dam. *Environmental Problems*, 2023. Vol. 8. No 4. P. 231–240 <https://doi.org/10.23939/ep2023.04.231>
15. 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>
16. Безсонний В. Л., Некос А. Н., Гололобова О. О. Оцінка екологічного ризику забруднення ґрунтів важкими металами. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*, 2024. № 31. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2024-31-02>
17. Velastegui-Montoya A., Montalván-Burbano N., et al. Google Earth Engine: A Global Analysis and Future Trends. *Remote Sensing*, 2023. Vol. 15. No 14. P.3675. <https://doi.org/10.3390/rs15143675>
18. Про затвердження Порядку ведення Державного земельного кадастру. Постанова Кабінету Міністрів України від 17 жовт. 2011 р. № 1051. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1051-2012-п> (дата звернення 15.03.2026)
19. Про затвердження переліку особливо цінних груп ґрунтів. Наказ Державного комітету України по земельних ресурсах від 06.10.2003 № 245. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0979-03> (дата звернення 15.03.2026)
20. Gao Q., Zribi M., Escorihuela M. J., Baghdadi N. Synergetic Use of Sentinel-1 and Sentinel-2 Data for Soil Moisture Mapping at 100 m Resolution. *Sensors*. 2017. Vol. 17, no. 9. P. 1966. <https://doi.org/10.3390/s17091966>
21. Ali A., Imran M., Khan M. A. Evaluating Sentinel-2 red edge through hyperspectral profiles for monitoring LAI & chlorophyll content of Kinnow Mandarin orchards. 2022. URL: <https://www.researchgate.net/publication/359199985>
22. Achasov A. B., Seliverstov O. Y., Diadin D. V., Siedov A. O. Remote monitoring of the consequences of hostilities on the territory of the Kharkiv region. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology*, 2023. No 28. P. 71-82. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2023-28-06>
23. Zhong L., Yang S., Rong Y., et al. Indirect Estimation of Heavy Metal Contamination in Rice Soil Using Spectral Techniques. *Plants*. 2024. Vol. 13, no. 6. P. 831. <https://doi.org/10.3390/plants13060831>
24. Zhong L., Chu X., Qian J., et al. Multi-Scale Stereoscopic Hyperspectral Remote Sensing Estimation of Heavy Metal Contamination in Wheat Soil. *Agronomy*. 2023. Vol. 13, no. 9. P. 2396. <https://doi.org/10.3390/agronomy13092396>

25. Lin W., Tu Y., Liu F., et al. Spectral characteristics of the correlation between elemental arsenic and vegetation stress in the Yueliangbao gold mining. *Environmental Geochemistry and Health*. 2023. Vol. 45. P. 8203–8219. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01693-7>
26. Rashid A., Schutte B., Ulery A., et al. Heavy Metal Contamination in Agricultural Soil: Environmental Pollutants Affecting Crop Health. *Agronomy*. 2023. Vol. 13, no. 6. P. 1521. : <https://doi.org/10.3390/agronomy13061521>
27. Chen S. et al. Identifying soil heavy metal sources in typical industrial cities: A comprehensive approach using receptor models and machine learning. *Science of the Total Environment*. 2024. Vol. 945. P. 174068. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174068>
28. Chen Y., Shi W., Aihemaitijiang G., et al. Hyperspectral inversion of heavy metal content in farmland soil under conservation tillage of black soils. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. P. 124 , <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83479-0>
29. Wang Y., Zuo X., Zou B., et al. A remote sensing analysis method for soil heavy metal pollution sources at site scale considering source-sink relationships. *The Science of the Total Environment*. 2024. Vol. 942. P. 174021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174021>
30. Lassalle G., Fabre S., Credoza A., et al. Mapping leaf metal content over industrial brownfields using airborne hyperspectral imaging and optimized vegetation indices. *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. P. 447. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79439-z>
31. Zhang L., Wang Y., Zou B., et al. Global analysis of the relationship between soil erosion and crop yield. *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 795. P. 148856. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148856>

Отримано: 22.03.2026 / Переглянуто: 23.04.2026 / Прийнято: 30.04.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

A. G. KOT¹,

PhD Student of the Department of Ecology and Environmental Management
e-mail: anna.kot@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4700-2620>

O. M. NEMOSHKALOV¹

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*

APPLICATION OF THE GOOGLE EARTH ENGINE PLATFORM FOR THE STUDY OF AGRICULTURAL LANDSCAPE CONDITIONS

The unprecedented degradation of Ukraine's soil cover as a result of the armed aggression of the Russian Federation is complicated by long-term processes of water and wind erosion. Traditional methods of surveying territories are currently limited due to mine danger, which makes remote sensing of the Earth a key tool for environmental assessment.

Purpose. Practical use of Google Earth Engine to assess the impact of soil erodibility and heavy metal contamination on the state of vegetation.

Methods. The study is based on a phytoindication approach using multispectral data from the Sentinel-2 satellite.

Results. Experimental studies were carried out during 2024-2025 on the basis of two representative test sites located within the Rohansk territorial community (Kharkiv district, Kharkiv region). To assess the state of vegetation (using the example of sunflower), the vegetation indices NDVI and NDRE were used. Processing of large data sets was carried out automatically in the GEE environment on the basis of two test sites in the Kharkiv region. At site No. 1, a comparative retrospective analysis of zones of potential heavy metal contamination (due to bomb disturbance) and background areas was conducted. It was established that phytoindication anomalies may have a natural origin, which emphasizes the importance of comparison with pre-war indicators for a correct assessment of war damage. At site No. 2, a clear correlation was found between the degree of erosion of black soils and the values of the NDRE index: the loss of every 10 cm of the soil genetic profile correlates with a decrease in the index by 0.01 units. The total crop loss due to erosion was calculated, which for the experimental site amounted to over 650 c.

Conclusions. The high efficiency of the NDRE index as an indicator of chlorophyll content in the late stages of vegetation has been proven. The results confirm that the integration of GIS technologies and satellite monitoring is an alternative basis for developing post-war land remediation strategies and implementing precision agriculture systems.

KEYWORDS: *land resources, remote sensing, Google Earth Engine, Sentinel-2, vegetation index, NDRE, soil erosion, military degradation*

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this manuscript. In addition, the authors have fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and duplicate publication.

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

AI Statement

The work used Gemini 3.0 artificial intelligence to develop an algorithm for the Google Earth Engine service.

References

- Baliuk S. A., Kucher A. V., & Maksymenko N. V. (2021). Soil resources of Ukraine: state, problems and strategy for sustainable management. *Ukrainian Geographical Journal*, (2), 3–11 DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2021.02.003> (in Ukrainian).
- Dudiak N., Pichura V., Potravka L., & Straticuk N. (2021). Environmental and economic effects of water and deflation destruction of steppe soil in Ukraine. *Journal of Water and Land Development*, (50), 10–26. <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.138156>
- Bulygin S., & Antonyuk D. (2016). Soil erosion in Ukraine. *Scientific Journal «Plant Growing and Soil Science»*, (235). Retrieved from <https://agriculturalscience.com.ua/uk/journals/235-2016>
- Sartori M., Ferrari E., M'Barek R., et al. (2024). Remaining Loyal to Our Soil: A Prospective Integrated Assessment of Soil Erosion on Global Food Security. *Ecological Economics*, 219, Article 108103. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108103>
- Kopittke P. M., Menzies N. W., Wang P., et al. (2019). Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environment International*, 132, Article 105078. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105078>
- Panagos P., Standardi G., Borrelli P., et al. (2018). Cost of agricultural productivity loss due to soil erosion in the European Union. *Land Degradation & Development*, 29(3), 471–484. <https://doi.org/10.1002/ldr.2879>
- Baliuk S. A., Kucher A. V., Solokha M. O., et al. (2022). Impact of armed aggression and hostilities on the current state of the soil cover, assessment of damage and losses, restoration measures: scientific report. Kharkiv: Brovin Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/367046551_Vpliv_zbrojnoi_agresii_ta_voen-nih_dij_na_sucasnij_stan_gruntovogo_pokrivu_ocinka_skodi_ta_zbitkiv_zahodi_z_vidnovlenna (in Ukrainian).
- Splodytel A., Holubtsov O., Chumachenko S., & Sorokina L. (2023). The impact of Russia's war against Ukraine on the state of Ukrainian soils. Kyiv: Ecoaction. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/367046551_Vpliv_zbrojnoi_agresii_ta_voen-nih_dij_na_sucasnij_stan_gruntovogo_pokrivu_ocinka_skodi_ta_zbitkiv_zahodi_z_vidnovlenna (in Ukrainian).
- 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>
- 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>
- 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>
- 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), 109–116. <https://doi.org/10.23939/ep2024.02.109>
- Solokha M., Demyanyuk O., Symochko L., et al. (2024). Soil Degradation and Contamination Due to Armed Conflict in Ukraine. *Land*, 13(10), Article 1614. <https://doi.org/10.3390/land13101614>
- Trokhymenko G., Magas N., Shumilova O., & Klochko V. (2023). Analysis of surface water quality indicators in the Dnipro-Bug estuary region after the destruction of the Kakhovka dam. *Environmental Problems*, 8(4), 231–240. <https://doi.org/10.23939/ep2023.04.231>
- 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>
- Bezsonnyi V. L., Nekos A. N., & Hololobova O. O. (2024). Assessment of environmental risk of soil pollution by heavy metals. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series «Ecology»*, (31) <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2024-31-02> (in Ukrainian).

17. Velastegui-Montoya A., Montalván-Burbano N., et al. (2023). Google Earth Engine: A Global Analysis and Future Trends. *Remote Sensing*, 15(14), 3675. <https://doi.org/10.3390/rs15143675>
18. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2011). On approval of the Procedure for maintaining the State Land Cadastre: Decree of October 17, 2011, No. 1051. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1051-2012-п> (in Ukrainian).
19. State Committee of Ukraine for Land Resources. (2003). On approval of the list of especially valuable groups of soils: Order of 06.10.2003 No. 245. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0979-03> (in Ukrainian).
20. Gao Q., Zribi M., Escorihuela M. J., & Baghdadi N. (2017). Synergetic Use of Sentinel-1 and Sentinel-2 Data for Soil Moisture Mapping at 100 m Resolution. *Sensors*, 17(9), 1966. <https://doi.org/10.3390/s17091966>
21. Ali A., Imran M., & Khan M. A. (2022). Evaluating Sentinel-2 red edge through hyperspectral profiles for monitoring LAI & chlorophyll content of Kinnow Mandarin orchards. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/359199985>
22. Achasov A. B., Seliverstov O. Y., Diadin D. V., & Siedov A. O. (2023). Remote monitoring of the consequences of hostilities on the territory of the 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>
23. Zhong L., Yang S., Rong Y., et al. (2024). Indirect Estimation of Heavy Metal Contamination in Rice Soil Using Spectral Techniques. *Plants*, 13(6), 831. <https://doi.org/10.3390/plants13060831>
24. Zhong L., Chu X., Qian J., et al. (2023). Multi-Scale Stereoscopic Hyperspectral Remote Sensing Estimation of Heavy Metal Contamination in Wheat Soil. *Agronomy*, 13(9), 2396. <https://doi.org/10.3390/agronomy13092396>
25. Lin W., Tu Y., Liu F., et al. (2023). Spectral characteristics of the correlation between elemental arsenic and vegetation stress in the Yueliangbao gold mining. *Environmental Geochemistry and Health*, 45, 8203–8219. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01693-7>
26. Rashid A., Schutte B., Ulery A., et al. (2023). Heavy Metal Contamination in Agricultural Soil: Environmental Pollutants Affecting Crop Health. *Agronomy*, 13(6), 1521. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061521>
27. Chen S., et al. (2024). Identifying soil heavy metal sources in typical industrial cities: A comprehensive approach using receptor models and machine learning. *Science of The Total Environment*, 945, 174068. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174068>
28. Chen Y., Shi W., Aihemaitijiang G., et al. (2025). Hyperspectral inversion of heavy metal content in farmland soil under conservation tillage of black soils. *Scientific Reports*, 15, 124. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83479-0>
29. Wang Y., Zuo X., Zou B., et al. (2024). A remote sensing analysis method for soil heavy metal pollution sources at site scale considering source-sink relationships. *The Science of the Total Environment*, 942, 174021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174021>
30. Lassalle G., Fabre S., Credoz A., et al. (2021). Mapping leaf metal content over industrial brownfields using airborne hyperspectral imaging and optimized vegetation indices. *Scientific Reports*, 11, 447. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79439-z>
31. Zhang L., Wang Y., Zou B., et al. (2021). Global analysis of the relationship between soil erosion and crop yield. *Science of The Total Environment*, 795, 148856. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148856>

Submission received: 22.03.2026 / Revised: 23.04.2026 / Accepted: 30.04.2026 / Published: 30.05.2026

<https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-16>

УДК (UDC): 633.81/.85: 68.35.37

В. М. НИКОНОВА, канд. с.-г. наук,
завідувач лабораторії селекції льону,
e-mail: vnikonova650@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9344-0483>
Інститут олійних культур НААН,
вул. Інститутська, 1, с. Сонячне, Запорізький район, Запорізька область, 69055, Україна

СТВОРЕННЯ СЕЛЕКЦІЙНО-ЦІННОГО МАТЕРІАЛУ НА БАЗІ ГЕНЕТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ЖИРНОКИСЛОТНОГО СКЛАДУ ЛЛЯНОЇ ОЛІЇ

Мета. Вивчення успадковування жирнокислотного складу лляної олії для успішного створення нового селекційного матеріалу з різним вмістом α -ліноленової кислоти, стійкого до посухи.

Методи. Генетичний аналіз, індивідуальний добір, статистичний, газорідинна хроматографія.

Результати. Проведено схрещування контрастних батьківських форм, низьколіноленового сорту Сонячний (9,7%) з високоліноленовими лініями М-17, ІЗ-2, М-28, М-48 (57,5-64,8%). Встановлено проміжне успадковування ліноленової кислоти (ω -3) та лінолевої (ω -6) у популяції F_1 . При визначенні істинного та гіпотетичного гетерозису, явище не виявлено. У популяціях F_2 підраховано високі коефіцієнти успадковування в широкому сенсі за ненасиченими жирними кислотами (ω -3 та ω -6). Успадковування у вузькому сенсі популяцій F_3 показало також високі значення за ненасиченими жирними кислотами, які досліджували.

Висновки. Вперше в Україні проведено генетичний контроль жирнокислотного складу лляної олії. Результати генетичного аналізу ненасичених жирних кислот (ω -3 та ω -6) у популяцій F_1 , F_2 та F_3 свідчать про ефективність добору ненасичених жирних кислот. Високі показники успадковування також демонструють адитивну дію генів, та незалежність від дуже посушливих умов вирощування льону олійного. Ефективний добір за ліноленової та лінолевої кислот дав змогу виділити ряд селекційно-цінного матеріалу та створити новий сорт Поживний харчового напрямку з вмістом ліноленової кислоти до 10 %, олія якого характеризується подовженими терміном зберігання.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: лляна олія, ω -3 ліноленова кислота, ω -6 лінолева кислота, характер домінування, успадковування, популяція F_1 - F_3 , сорт

Як цитувати: Ніконова В. М. Створення селекційно-цінного матеріалу на базі генетичного контролю жирнокислотного складу лляної олії. *Проблеми неоекології*. 2026. Вип. 45. С. 213–220. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-16>

In cites: Nikonova, V. M. (2026). Creation of breeding material based on genetic control of the fatty acid composition of flaxseed oil. *Man and Environment. Issues of Neoecology*, (45), 213–220. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-16> (in Ukrainian)

Вступ

За останні десятиліття харчовий ландшафт кардинально змінився. Здорове та різноманітне харчування виходить на перший план. Лляна олія крім технічного напрямку використання, набула популярності як цінна харчова добавка. Вона містить ω -3, ω -6, ω -9, лігнани, білки, харчові волокна, вітаміни, мінерали (Са, Mg, Na, К, Р, Cu, Fe, Mn, Zn та В), феноли, флавоноїди.

Лігнани в лляній олії – це потужні рослинні сполуки (фітоестрогени) та антиоксиданти, які містяться в частинках насіння льону мають додаткові переваги для

здоров'я, окрім високого вмісту ω -3. Лляна олія покращує загальний стан здоров'я, підтримує самопочуття та підвищує якість життя, запобігаючи або полегшуючи хронічні захворювання [1,2,3]. Але недоліком лляної олії є її висока чутливість до тепла, світла та впливу кисню. Вирішенням цієї проблеми є створення нових сортів льону олійного з різним вмістом ліноленової (ω -3) та лінолевої (ω -6) кислот, стійких до посухи [4]. Вивчення генетики успадковування жирнокислотного складу олії є основним в цьому аспекті.

© Ніконова В. М., 2026



[This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Дослідження генетичного контролю вмісту ненасичених жирних кислот в олії насіння льону [5] та сої [6] продемонстрували адитивну (кодомінантну) дію генів. У насінні гібридів F_1 успадкування ліноленової кислоти було проміжним. Розподіл F_3 насіння з рослин F_2 з проміжними рівнями 18:3 був подібним до розподілу F_2 [6].

Результати дослідження Zhang та інш. [7] на *Brassica napus* довели, що вміст ліноленової кислоти у F_1 був нижчим, ніж у обох батьків, що вказує на частковий неалелізм батьківських генів. Очевидного гетерозису не спостерігалось. З іншого боку, успадкування вмісту ліноленової кислоти є досить складним процесом, на який впливають ядерні гени, стан розвитку ембріона [8].

Walkowiak та інші [9] відзначили серед гібридів F_1 значну асиметрію в розподілі алелів генів, що визначають вміст олеїнової, лінолевої та α -ліноленової кислот. Оцінка середнього ступеня домінування $(H1/D)1/2$ для лінолевої та α -ліноленової кислот показала неповне домінування. Також були встановлені високі коефіцієнти спадковості у широкому

сенсі для лінолевої (0,88-0,89) та ліноленової кислот (0,86-0,94).

Висока спадковість у поєднанні з високим або помірним генетичним прогресом була виявлена олеїнової та ліноленової кислот [10]. Тоді як середня спадковість була показана для ліноленової та лінолевої кислоти [11].

Дослідники, які проводили генетичний аналіз вмісту жирних кислот в олії, виявили домінування адитивної мінливості над неадитивною. Стосовно льону, виявлено, що вміст ліноленової кислоти детермінується двома незалежними генами з адитивною дією. При цьому спостерігалась висока та середня спадковість для ненасичених жирних кислот.

Але в умовах сильної посухи України (зона Степу) викликає зацікавленість: варіабельність певної ознаки значною мірою зумовлювана генетичними факторами чи впливом навколишнього середовища.

Метою є вивчення успадкування жирнокислотного складу лляної олії для успішного створення нового селекційного матеріалу з різним вмістом α -ліноленової кислоти, стійкого до посухи.

Об'єкти та методи досліджень

Об'єктом дослідження є генетика жирнокислотного складу лляної олії льону.

Польові дослідження проводились у 2023-2025 рр. у Інституті олійних культур НААН України (Запорізька область, зона Степу). Закладання дослідів, усі вимірювання та спостереження проводили у відповідності з рекомендаціями [12]. Дослідженнями передбачалося проведення фенологічних спостережень, морфологічних досліджень, оцінювання селекційного матеріалу за господарсько-цінними ознаками і характеристиками.

Для встановлення успадкованості жирнокислотного складу олії, були досліджені сім внутрішньовидових комбінацій F_1 (Сонячний х М-17, Сонячний х М-48, М-48 х Сонячний, Сонячний х ІЗ-2, ІЗ-2 х Сонячний, Сонячний х М-28, М-28 х Сонячний).

Характер домінування гібридів F_1 у даному дослідженні визначали за показником ступеня домінування за формулою [13].

$$h_p = \frac{F_1 - MP}{P - MP}$$

де F_1 – середня арифметична для ознак гібридів першого покоління;

MP – середня арифметична для ознак двох батьківських форм;

P – середня арифметична для батьківської форми з більшим рівнем ознаки.

Характер успадкування визначали згідно градації :

$h_p > +1,0$ – позитивне наддомінування (гетерозис)

$+0,5 < h_p \leq +1,0$ – позитивне домінування;

$-0,5 \geq h_p \leq +0,5$ – проміжне успадкування;

$-1,0 \leq h_p < -0,5$ – негативне домінування

$h_p < -1,0$ – негативне наддомінування (депресія).

Існує декілька типів гетерозису.

Справжній гетерозис розраховується як виражене у відсотках відношення різниці між ознакою гібрида (F_1) та найбільшою величиною ознаки батьківської пари (P_{max}) до найбільшої величини ознаки батьківської пари.

Гіпотетичний гетерозис визначається як виражене у відсотках відношення різниці між ознакою гібрида (F_1) та середньою величиною ознаки батьківської пари ($P_{сер}$) до середньої величини ознаки батьківської пари [14,15,16].

Успадкування у широкому сенсі вмісту жирних кислот в олії проводили на трьох внутрішньовидових популяціях F_2 (Сонячний х М-28, Сонячний х М-48, Сонячний х ІЗ-2). Було проаналізовано по 150 гібридних рослин

F₂ та по 20 рослин F₁ і батьківських форм P₁, P₂. Коефіцієнти успадкованості (H) визначали за формулою [9].

$$H=(F_2-(P_1+P_2+F_1):3):F_2,$$

Де P₁, P₂, F₁, F₂- дисперсії ознак.

Згідно з загальноприйнятою градацією, коефіцієнти успадкованості поділялись на:

високі – 0,66-1,0;

середні – 0,33-0,65;

низькі – 0,0-0,32.

Успадковування у вузькому сенсі вмісту жирних кислот в олії проводили на одній внутрішньовидовій комбінації (Сонячний x М-28). Для визначення вузько-спрямованої спадковості було проаналізовано по 150 гібридних рослин F₃, F₂ за формулою [17,18]

$$h^2(\%) = (G/S \times 100\%),$$

де Selection gain (G= C-A),

differential selection (S = B-A);

(А) - середнє значення ознаки в популяції F₂,

(В) – значення ознаки в результаті відбору в F₂,

(С) – значення ознаки в результаті відбору в F₃.

Дисперсійний аналіз здійснювали в програмному пакеті Microsoft Excel.

Визначення жирно-кислотного складу насіння проводили методом газорідинної хроматографії (ГРХ) у лабораторії приладо-вимірвальних комплексів та масових аналізів ІОК. Розподіл суміші високомолекулярних жирних кислот на окремі компоненти робили на газорідинному хроматографі «НР 6890». Для підрахунку відсоткового вмісту кожної жирної кислоти розраховували загальну площу піків, беручи її за 100 %. Потім, знаходячи частину піка кожної жирної кислоти у відсотках, отримали значення їх процентного вмісту [19].

Результати дослідження та обговорення

При схрещуванні низьколіноленового сорту Сонячний (9,7%) з високо-ліноленовими лініями М-17, ІЗ-2, М-28, М-48 (57,5-

64,8%) виявлено, що успадкування ліноленової кислоти має в F₁ проміжний характер (таб.1).

Таблиця 1

Ступінь домінування у F₁ за складом ліноленової кислоти у насінні льону олійного, 2023 рік

Table 1

Degree of dominance in F₁ by linolenic acid composition in oilseed flax, 2023

Гібридна комбінація / Hybrid combination	Вміст ліноленової кислоти,% / Linolenic acid content,%			Ступінь домінування / Degree of dominance		Гетерозис,% / Heterosis,%	
	P ₁ (♀)	P ₂ (♂)	F ₁	hp	Тип/ Type	ІГ	ГГ
Сонячний / Sunny x М-17	9,7±0,12	54,4±2,26	34,1±2,53	0,09	ПУ	-37,0	+6,2
Сонячний / Sunny x ІЗ-2	9,7±0,12	57,5±0,17	34,1±2,53	0,02	ПУ	-40,7	+1,4
ІЗ-2 x Сонячний / Sunny	57,5±0,17	9,7±0,12	37,8±4,02	0,17	ПУ	-34,3	+12,5
Сонячний / Sunny x М-48	9,7±0,12	64,8±0,64	41,2±0,86	0,14	ПУ	-36,4	+10,5
М-48 x Сонячний / Sunny	64,8±0,64	9,7±0,12	41,2±0,05	0,14	ПУ	-36,4	+10,5
Сонячний / Sunny x М-28	9,7±0,12	60,0±1,83	40,8±2,27	0,23	ПУ	-32,0	+2,9
М-28 x Сонячний / Sunny	60,0±1,83	9,7±0,12	38,9±2,36	0,16	ПУ	-21,1	+11,5

Примітка: ПУ-проміжне успадковування, ІГ-істинний гетерозис, ГГ- гіпотетичний гетерозис.

Note: ПУ -intermediate inheritance, ІГ -true heterosis, ГГ -hypothetical heterosis.

Вміст ліноленової кислоти в F₁ варіював від 34,1 % у комбінаціях схрещування Сонячний х М-17, Сонячний х ІЗ-2 до 41,2 % у комбінаціях схрещування Сонячний х М-48, М-48 х Сонячний.

При цьому, найменша ступінь домінування була від 0,02-0,09 у комбінаціях схрещування Сонячний х М-17, Сонячний х ІЗ-2, а найбільша 0,23 у комбінації Сонячний х М-28. Залежності від напрямку схрещування (прямі, зворотні) не спостерігалось.

При обчисленні показників істинного гетерозиса у всіх популяціях F₁ відмічено негативне значення, а гіпотетичний гетерозис показав позитивні значення від 1,4 до 12,5%.

Вибір відповідних компонентів для схрещування є першим і найважливішим кроком у створенні нових сортів з бажаними ознаками. Для виведення нових сортів необхідно

знати, як успадковуються досліджувані ознаки. Це дозволить селекціонерам вибрати найефективнішу стратегію відбору. Середня продуктивність батьківської лінії в гібридних комбінаціях відображає адитивну дію генів та частоту сприятливих алелів.

Успадковуваність ознаки в широкому сенсі - це частка фенотипової варіації, що пояснюється генетичними причинами, тоді як вузькоспрямована спадковість - це частка, що пояснюється адитивною дією генів [18].

Як модель для вивчення успадковуваності жирно-кислотного складу олії, досліджено три внутрішньовидові комбінації F₂ (Сонячний х М-48, Сонячний х ІЗ-2, Сонячний х М-28). Батьківські компоненти були контрастними за вмістом ліноленової та лінолевої кислот (табл. 2).

Таблиця 2
Успадковуваність жирнокислотного складу у гібридів F₂ льону олійного, 2024 р.

Table 2

Heritability of fatty acid composition in F₂ hybrids of oilseed flax, 2024

Гібридна комбінація / Hybrid combination	Дисперсія ознаки/ Trait variance				H
	P ₁ (♀)	P ₂ (♂)	F ₁	F ₂	
Сонячний х М-48 /Sunny x M-48	Ліноленова кислота / Linolenic acid				0,98
	1,98	3,99	3,75	197,46	
	Лінолева кислота / Linolenic acid				
Сонячний х ІЗ-2 /Sunny x IZ-2	Ліноленова кислота / Linolenic acid				0,94
	1,98	4,30	31,93	212,71	
	Лінолева кислота / Linolenic acid				
Сонячний х М-28 /Sunny x M-28	Ліноленова кислота / Linolenic acid				0,93
	1,98	0,40	33,79	173,25	
	Лінолева кислота / Linolenic acid				
Сонячний х М-48 /Sunny x M-48	Ліноленова кислота / Linolenic acid				0,98
	1,98	0,40	33,79	173,25	
	Лінолева кислота / Linolenic acid				
Сонячний х ІЗ-2 /Sunny x IZ-2	Ліноленова кислота / Linolenic acid				0,94
	1,98	4,30	31,93	212,71	
	Лінолева кислота / Linolenic acid				
Сонячний х М-28 /Sunny x M-28	Ліноленова кислота / Linolenic acid				0,93
	1,98	0,40	33,79	173,25	
	Лінолева кислота / Linolenic acid				
Сонячний х М-48 /Sunny x M-48	Ліноленова кислота / Linolenic acid				0,98
	1,98	0,40	33,79	173,25	
	Лінолева кислота / Linolenic acid				
Сонячний х ІЗ-2 /Sunny x IZ-2	Ліноленова кислота / Linolenic acid				0,94
	1,98	4,30	31,93	212,71	
	Лінолева кислота / Linolenic acid				
Сонячний х М-28 /Sunny x M-28	Ліноленова кислота / Linolenic acid				0,93
	1,98	0,40	33,79	173,25	
	Лінолева кислота / Linolenic acid				
Сонячний х М-48 /Sunny x M-48	Ліноленова кислота / Linolenic acid				0,98
	1,98	0,40	33,79	173,25	
	Лінолева кислота / Linolenic acid				
Сонячний х ІЗ-2 /Sunny x IZ-2	Ліноленова кислота / Linolenic acid				0,94
	1,98	4,30	31,93	212,71	
	Лінолева кислота / Linolenic acid				
Сонячний х М-28 /Sunny x M-28	Ліноленова кислота / Linolenic acid				0,93
	1,98	0,40	33,79	173,25	
	Лінолева кислота / Linolenic acid				

Як визначено з таблиці 2, коефіцієнти успадковуваності у широкому сенсі у досліджуваних комбінаціях для ненасичених жирних кислот (ліноленової та лінолевої) були високими (0,93-0,98).

Дисперсія ліноленової кислоти у популяції F₁ комбінації схрещування Сонячний х М-48 складала найменше значення – 3,75, у порівнянні з двома іншими комбінаціями. В комбінаціях Сонячний х ІЗ-2 та Сонячний х М-28 цей показник становив 31,93-33,79. У популяції F₂ дисперсія ліноленової кислоти у комбінаціях які досліджували варіювала від 173,5 до 212,71. За лінолевої кислоти спостерігалися аналогічні значення. Результати дисперсійного аналізу продемонстрували високу успадковуваність в широкому сенсі (H=0,93-

0,98), що свідчить про ефективний відбір для ліноленової та ліноленової кислот.

Високі значення успадковуваності вказують на те, що ознаки, що досліджуються, менш залежать від навколишнього середовища в їхній експресії.

Модель розщеплення за вмістом ліноленової кислоти була близькою до 15:1. Тобто вміст даної ненасиченої жирної кислоти детермінують два незалежних гени з адитивною дією.

Вузько-спрямоване успадковування – це прямий підхід, який передбачає порівняння реакцій відбору та диференціалів відбору. Ця концепція вважається ефективною для оцінки стабільності реакції відбору ознаки з двох різних поколінь з неоднаковими впливами

навколишнього середовища. Ефективність цієї концепції також була продемонстрована Farid et al. [18] на популяціях томатів F₃.

Більшість робіт присвячено вивченню кількісних ознак продуктивності, і дуже мало відомо про успадковування жирно-кислотного складу олії льону в популяціях F₃. Тому нами був проведений аналіз вузько-спрямованого успадковування цієї ознаки.

Встановлено високий рівень позитивного успадкування за вмістом ліноленової кислоти (72,88 - 94,61 %) та лінолевої кислоти (93,73 - 139,01 %) при доборі в популяціях F₃ з вмістом ліноленової кислоти в межах 10-40 % (табл.3).

Так, при відборі ліноленової кислоти 30-40 % визначено мінімальне значення вузько-специфічного успадковування +72,88% для ліноленової кислоти та максимальне значення +139,01 % для лінолевої кислоти.

В цілому, значення вузько-специфічного успадковування знаходиться на високому рівні не залежно від відбору ліноленової кислоти 10-40 %.

Таким чином, чим вище значення успадкованості, тим нижчий екологічний вплив на вираження ознаки, який перешкоджає ефективному відбору генотипів.

Тобто, добір у двох різних популяції F₂-F₃ за «жирнокислотним складом олії» є ефективним.

Таблиця 3

**Вузько-спрямоване успадковування у популяції F₃
Сонячний x M-28 при доборі ліноленової кислоти 10-40 %, 2025 р.**

Table 3

**Narrowly directional inheritance in the F₃ population
Sunny x M-28 when selecting for linolenic acid 10-40%, 2025**

Популяція F ₃ Сонячний x M-28 / Population F ₃ Sonnyachny x M-28					
Параметр /Parameter	Назва кислот / Name of acids	Вміст ліноленової кислоти до 10 % / Linolenic acid content up to 10%	Вміст ліноленової кислоти до 10-20 % / Linolenic acid content up to 10-20%	Вміст ліноленової кислоти до 20-30 % / Linolenic acid content up to 20-30%	Вміст ліноленової кислоти до 30-40 % / Linolenic acid content up to 30-40%
F ₂ based population (A)	Лінолева / Linolenic	31,81±1,02	31,81±1,02	31,81±1,02	31,81±1,02
	Ліноленова / Linolenic	38,20±0,98	38,20±0,98	38,20±0,98	38,20±0,98
F ₂ selected (B)	Лінолева / Linolenic	67,21±1,40	55,12±1,23	48,14±1,09	36,68±1,13
	Ліноленова / Linolenic	4,19±1,12	17,58±1,09	21,49±1,05	33,70±1,08
F ₃ selected (C)	Лінолева / Linolenic	71,15±1,03	53,66±1,18	49,79±1,08	38,58±1,10
	Ліноленова / Linolenic	6,07±1,14	20,96±1,04	22,39±1,11	34,92±0,99
Differential selection (S = B-A)	Лінолева / Linolenic	35,7±1,09	23,31±0,97	+16,33±1,14	+4,87±1,12
	Ліноленова / Linolenic	-34,01±0,90	-20,60±1,06	-16,71±0,99	-4,50±0,89
Selection gain (G= C-A)	Лінолева / Linolenic	39,34±1,10	21,85±0,98	+17,98±1,03	+6,77±1,01
	Ліноленова / Linolenic	-32,13±1,07	-17,30±1,09	-15,81±1,12	-3,28±1,15
h ² (%) =(G/Sx 100%)	Лінолева / Linolenic	+110,19	+93,73	+110,10	+139,01
	Ліноленова / Linolenic	+94,47	+83,98	+94,61	+72,88

Висновки

Вперше в умовах посушливої зони Ук-раїні було досліджено генетичний аналіз F₁-F₃ ненасичених жирних кислот у лляній олії.

Виявлено, що успадковування ліноле-нової кислоти у лляній олії має проміжний характер в популяції F₁. Явище гетерозису не виявлено.

Успадковуваність у широкому розу-мінні в досліджуваних комбінаціях F₂ для ненасичених жирних кислот (ліноленової та лінолевої) була висока.

Вузько-спрямоване успадковування у популяції F₃ продемонструвало трохи нижчі показники, ніж у широкому розумінні, але вони залишаються на високому рівні. Це до-звولیло провести ефективний індивідуаль-ний відбір вже в ранніх поколіннях (F₂-F₃),

оскільки фенотип рослини майже точно ві-дображає її генотип.

Підтверджено адитивну дію генів. Тому селекціонер може безпечно здійсню-вати свій відбір на основі фенотипової ек-спресії цих ознак в окремій рослині, засто-суючи прості методи відбору.

На базі вивченого генетичного конт-ролю виділено ряд селекційно-цінних зраз-ків з різним вмістом ненасичених жирних кислот та високою стійкістю до посухи.

Створено новий сорт Поживний харчо-вого використання з вмістом ліноленової ки-слоти до 10 %, стійкий до посухи, який про-ходить державне сорто випробування [20]. Цей сорт рекомендовано для переробки на харчову олію, яка має подовжений строк зберігання.

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

В роботі не використано ресурс штучного інтелекту.

Список використаної літератури

1. Homroy S., Bapputty R.M., Chopra R., Soni R., Sanglekar D., Shah V. Nutritional Benefits of Linseed Oil-Based Omega-3 Fatty Acids. In: Chopra, R., Singh, A., Oberoi, H.S. (eds) Dynamics of Linseed and its Valorization. Springer, 2025. Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-96-8927-9_8
2. Vergara Nieto A. A., Díaz A. H., Hernández Millán, M., Sagredo, D. Molecular Features, Effective Sources, and Physiological Effects of Omega-3 Unsaturated Fatty Acids on Cardiovascular, Neurological, and Muscular Health, and Clinical Relevance for Several Conditions: A Narrative Review. *Nutrition Reviews*. 2025. nuaf201. <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuaf201>
3. Duarte S., Shah M. A., Sanches Silva A. Flaxseed in Diet: A Comprehensive Look at Pros and Cons. *Molecules*. 2025. Vol. 30. № 6. 1335. <https://doi.org/10.3390/molecules30061335>
4. Полякова І., Соколов В., Молодченкова О., Безкровна Л., Лях В. Біохімічні особливості насіння сортів льону олійного спеціального призначення. *Хімія харчових продуктів і матеріалів. Нові види сировини*. 2023. Т. 16. № 4. <https://doi.org/10.15673/fst.v16i4.2540>
5. Green, A. G. Genetic control of polyunsaturated fatty acid biosynthesis in flax (*Linum usitatissimum*) seed oil. *Theoretical and Applied Genetics*. 1986. Vol. 72. № 5. P. 654-661. <https://doi.org/10.1007/BF00289004>
6. Wilcox J. R., & Cavins J. F. Inheritance of low linolenic acid content of the seed oil of a mutant in Glycine max. *Theoretical and Applied Genetics*. 1985. Vol. 71. № 1. P. 74-78. <https://doi.org/10.1007/BF00278257>
7. Zhang X., Lian J., Dai C., Wang X., Zhang M., Su X., Yu C. Genetic segregation analysis of unsaturated fatty acids content in the filial generations of high-linolenic-acid rapeseed (*Brassica napus*). *Oil Crop Science*. 2021. Vol. 6. № 4. P. 169-174. <https://doi.org/10.1016/j.ocsci.2021.10.001>
8. Mendes A., Kelly, A. A., Van Erp H., Shaw E., Powers S. J., Kurup S., Eastmond P. J. bZIP67 regulates the omega-3 fatty acid content of Arabidopsis seed oil by activating fatty acid desaturase3. *The Plant Cell*. 2013. Vol. 25. № 8. P. 3104-3116. <https://doi.org/10.1105/tpc.113.116343>
9. Walkowiak M., Spasibonek S. Krótka, K. Variation and genetic analysis of fatty acid composition in flax (*Linum usitatissimum* L.). *Euphytica*. 2022. 218, 2. <https://doi.org/10.1007/s10681-021-02941-6>
10. Choudhary V.R., Ram S., Kumar Rajesh C. A., Bhushan S., Medha P. Genetic variability and heritability estimates for morphological and quality traits in linseed (*Linum usitatissimum* L.). *Adv. Res. J Crop Improv*. 2016. Vol. 7. № 1. P. 121-128. <https://doi.org/10.15740/HAS/ARJCI/7.1/121-128>
11. Yadav K., Yadav R. K., Dubey S. D., Singh H. K., Vishwanath Yogesh and Sanjeev K. A study on midgeneration analysis for seed yield and associated traits in flaxseed (*Linum usitatissimum* L.). *International*

- Journal of Microbiological Research*. 2018. Vol. 10. P.1027-1034. <http://dx.doi.org/10.9735/0975-5276.10.3.1097-1103>
12. Лях В., Товстановська Т., Полякова І. Селекція та первинне насінництво льону. Методичні рекомендації. Запоріжжя: Інститут олійних культур НААН, 2023. 41 с. <http://imk.zp.ua/index.php/naukovi-vydannia/rekomendatsii/440-2023-11-15-10-29-48> (дата звернення 26.03.2026)
 13. Beil G. M., Atkins R.E Inheritance of quantitative characters in grain sorghum. *Iowa State J. Sci.* 1965. Vol. 39. № 3. P. 345-358
 14. Matzinger D.F., Mannand T.J., Cockerham C.C. Diallel cross in *Nicotiana tabacum*. *Crop Science*. 1962. № 2. P. 238-286. <https://doi.org/10.2135/cropsci1962.0011183X000200050006x>
 15. Fonseca S., Patterson F. L. Hybrid vigor in a seven parent diallel cross in common winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Crop Science*. 1968. Vol. 8. № 1. P. 85-88. <https://doi.org/10.2135/cropsci1968.0011183X000800010025x>
 16. Sherbakova Yu. Inheritance of economically valuable characteristics in intervarious hybrids of wheat in soft winter under forest steppe. *Norwegian journal of development of international science*. 2021. № 55-2. P.16-20. URL: https://nor-ijournal.com/wp-content/uploads/2023/09/NJD_55_2.pdf
 17. Dewi S. M., Syukur M. Interaksi genotipe x lingkungan hasil dan komponen hasil 14 genotipe tomat di empat lingkungan dataran rendah. *Jurnal Agronomi Indonesia (Indonesian Journal of Agronomy)*. 2015. Vol. 43. № 1. P. 59-65. <https://doi.org/10.24831/jai.v43i1.9592>
 18. Farid M., Anshori M.F., Ridwan I. Tomato F₃ lines development and its selection index based on narrow-sense heritability and factor analysis. *Biodiversitas: Journal of Biological Diversity*. 2022. Vol. 23. № 11. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d231132>
 - 19 ДСТУ ISO 5508:2001. Олії та жири тваринні і рослинні. Аналіз методом газової хроматографії метилових ефірів жирних кислот (ISO 5508:1990, IDT). Чинний від 2003-01-01. Держстандарт України. 2003. 9 с. URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_iso_5508-2001.pdf (дата звернення 26.03.2026)
 20. Ніконова В.М., Лях В.О., Полякова І. О., Безсусідній О.В., Левченко В.І., Луїнос Т.М. Особливості нової лінії льону олійного харчового використання. Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН. 2025. Вип. 39. С. 74-82. <https://doi.org/10.36710/IOC-2025-39-07>

Отримано: 06.04.2026 / Переглянуто: 06.05.2026 / Прийнято: 11.05.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

V. M. NIKONOVA, PhD (Agriculture),
Head of the Flax Breeding Laboratory,

e-mail: vnikonova650@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9344-0483>

Institute of Oil Crops of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine,

1, Institutskaya Str., Soniachne village, Zaporizhzhia District, Zaporizhzhia Region, 69055, Ukraine

CREATION OF BREEDING MATERIAL BASED ON GENETIC CONTROL OF THE FATTY ACID COMPOSITION OF FLAXSEED OIL

Purpose. To study the inheritance of the fatty acid composition of flaxseed oil for the successful development of new breeding material with varying levels of α -linolenic acid that is drought-tolerant.

Methods. Genetic analysis, individual selection, statistical analysis, gas-liquid chromatography.

Results. Crossbreeding was conducted between contrasting parental forms: the low-linolenic variety Soniachnyi and the high-linolenic lines M-17, IZ-2, M-28, and M-48. Intermediate inheritance of linolenic acid (ω -3) and linoleic acid (ω -6) was established in the F₁ population. When determining true and hypothetical heterosis, the phenomenon was not detected. In the F₂ populations, high heritability coefficients in the broad sense were calculated for unsaturated fatty acids (ω -3 and ω -6). Heritability in the narrow sense in the F₃ populations also showed high values for the unsaturated fatty acids studied.

Conclusions. For the first time in Ukraine, genetic control of the fatty acid composition of flaxseed oil has been conducted. The results of genetic analysis of unsaturated fatty acids (ω -3 and ω -6) in the F₁, F₂, and F₃ populations indicate the effectiveness of selection for unsaturated fatty acids. High heritability indices also demonstrate the additive effect of genes and independence from very arid growing conditions for oil flax. Effective selection for linolenic and linoleic acids made it possible to identify a number of breeding materials of high value and to create a new variety, "Nutritious," intended for food use, with a linolenic acid content of up to 10%, whose oil is characterized by extended shelf life.

KEYWORDS: *flaxseed oil, omega-3 linolenic acid, omega-6 linoleic acid, dominance, inheritance, F₁-F₃ populations, variety*

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. Homroy S., Bapputty R.M., Chopra R., Soni R., Sanglekar D., Shah V. (2025). Nutritional Benefits of Linseed Oil-Based Omega-3 Fatty Acids. In: Chopra, R., Singh, A., Oberoi, H.S. (eds) Dynamics of Linseed and its Valorization. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-96-8927-9_8
2. Vergara Nieto A. A., Díaz A. H., Hernández Millán M., & Sagredo, D. (2025). Molecular Features, Effective Sources, and Physiological Effects of Omega-3 Unsaturated Fatty Acids on Cardiovascular, Neurological, and Muscular Health, and Clinical Relevance for Several Conditions: A Narrative Review. *Nutrition Reviews*, nuaf201. <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuaf201>
3. Duarte S., Shah M. A., & Sanches Silva A. (2025). Flaxseed in Diet: A Comprehensive Look at Pros and Cons. *Molecules*, 30(6), 1335. <https://doi.org/10.3390/molecules30061335>
4. Poliakova I, Sokolov V, Molodchenkova O, Bezukrovna L, Lyakh V (2023) Biochemical features of the seeds of oil flax varieties for special purposes. *Food Science and Technology*, 16 (4). <https://doi.org/10.15673/fst.v16i4.2540> (in Ukrainian)
5. Green A. G. (1986). Genetic control of polyunsaturated fatty acid biosynthesis in flax (*Linum usitatissimum*) seed oil. *Theoretical and Applied Genetics*, 72(5), 654-661. <https://doi.org/10.1007/BF00289004>
6. Wilcox J. R., & Cavins J. F. (1985). Inheritance of low linolenic acid content of the seed oil of a mutant in Glycine max. *Theoretical and Applied Genetics*, 71(1), 74-78. <https://doi.org/10.1007/BF00278257>
7. Zhang X., Lian J., Dai C., Wang X., Zhang M., Su X., Yu C. (2021). Genetic segregation analysis of unsaturated fatty acids content in the filial generations of high-linolenic-acid rapeseed (*Brassica napus*). *Oil Crop Science*, 6(4), 169-174. <https://doi.org/10.1016/j.ocsci.2021.10.001>
8. Mendes A., Kelly A. A., Van Erp H., Shaw E., Powers S. J., Kurup S., Eastmond P. J. (2013). bZIP67 regulates the omega-3 fatty acid content of Arabidopsis seed oil by activating fatty acid desaturase3. *The Plant Cell*, 25(8), 3104-3116. <https://doi.org/10.1105/tpc.113.116343>
9. Walkowiak M., Spasibionek S. & Krótka K. (2022). Variation and genetic analysis of fatty acid composition in flax (*Linum usitatissimum* L.). *Euphytica*, 218, 2. <https://doi.org/10.1007/s10681-021-02941-6>
10. Choudhary V.R., Ram S., Kumar Rajesh C. A., Bhushan S., Medha P. (2016). Genetic variability and heritability estimates for morphological and quality traits in linseed (*Linum usitatissimum* L.). *Adv. Res. J Crop Improv*, 7(1), 121-128. <https://doi.org/10.15740/HAS/ARJCI/7.1/121-128>
11. Yadav K., Yadav R. K., Dubey S. D., Singh H. K., Vishwanath Yogesh and Sanjeev K. (2018.) A study on midgeneration analysis for seed yield and associated traits in flaxseed (*Linum usitatissimum* L.). *International Journal of Microbiological Research*. 10.1027-1034. <http://dx.doi.org/10.9735/0975-5276.10.3.1097-1103>
12. Lyakh V, Tovstanovska T, Poliakova I (2023). Selection and primary breeding of Lyon. Methodical recommendations. Zaporizhzhya: Institute of Olive Cultures of the National Academy of Sciences of Ukraine. Retrieved from <http://imk.zp.ua/index.php/naukovi-vydannia/rekomendatsii/440-2023-11-15-10-29-48> (in Ukrainian)
13. Beil, G. M., & Atkins, R. E. (1965). Inheritance of quantitative characters in grain sorghum. *Iowa State Journal of Science*, 39(3), 345-358.
14. Matzinger D.F., Mannand T.J., Cockerham C.C. (1962). Diallel cross in *Nicotiana tabacum*. *Crop Science*. (2), 238-286. <https://doi.org/10.2135/cropsci1962.0011183X000200050006x>
15. Fonseca S., Patterson F. L. (1968). Hybrid vigor in a seven parent diallel cross in common winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Crop Science*, 8(1), 85-88. <https://doi.org/10.2135/cropsci1968.0011183X000800010025x>
16. Sherbakova Yu (2021). Inheritance of economically valuable characteristics in intervarious hybrids of wheat in soft winter under forest steppe. *Norwegian journal of development of international science*, (55-2), 16-20. Retrieved from https://nor-ijournal.com/wp-content/uploads/2023/09/NJD_55_2.pdf
17. Dewi S. M., Syukur M. (2015). Interaksi genotipe x lingkungan hasil dan komponen hasil 14 genotipe tomat di empat lingkungan dataran rendah. *Jurnal Agronomi Indonesia (Indonesian Journal of Agronomy)*, 43(1), 59-65. <https://doi.org/10.24831/jai.v43i1.9592>
18. Farid M., Anshori M.F., Ridwan I. (2022). Tomato F₃ lines development and its selection index based on narrow-sense heritability and factor analysis. *Biodiversitas: Journal of Biological Diversity*, 23(11). <https://doi.org/10.13057/biodiv/d231132>
19. DSTU ISO 5508:2001. Animal and vegetable oils and fats. Analysis of fatty acid methyl esters by gas chromatography (ISO 5508:1990, IDT). (2003). Valid from 2003-01-01. State Standard of Ukraine. Retrieved from https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_iso_5508-2001.pdf (in Ukrainian)
20. Nikonova V.M., Lyakh V.O., Poliakova I.O., Bezsusidny O.V., Levchenko V.I., Lupinos T. M. (2025). Features of the new line of food-used oil flax. *Scientific and Technical Bulletin of the Institute of Oilseed Crops, National Academy of Agrarian Sciences*. (39), 74-82. <https://doi.org/10.36710/IOC-2025-39-07> (in Ukrainian)

Submission received: 06.04.2026 / Revised: 06.05.2026 / Accepted: 11.05.2026 / Published: 30.05.2026

<https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-17>

UDC: 631.52:631.5

H. M. KORPITA¹, PhD (Agriculture),

Associate Professor of the Department of Genetics, Breeding and Plant Protection

e-mail: korpita@ukr.net ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0908-0129>

I. A. SHUVAR¹, DSc (Agriculture), Prof.,

Professor of the Department of Plant Growing Technologies

e-mail: shuvaria@ukr.net ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4149-1761>

¹*Stepan Gzhyskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies of Lviv*
1, Volodymyra Velykoho Str., Dubliany, Lviv Oblast, 80831, Ukraine

CONTROL OF *SOLIDAGO CANADENSIS* L. USING VARIOUS HERBICIDE PROTECTION SCHEMES

The aggressive spread of the invasive plant *Solidago canadensis* L. poses a serious threat to Ukraine's phytocenoses. This species rapidly colonizes areas due to the high viability of its root system and its wide ecological adaptability, making control by traditional methods difficult.

Purpose. The purpose of this study is to evaluate the effectiveness of three herbicide treatment schemes for controlling *Solidago canadensis* L., using herbicides based on dicamba, triasulfuron, and glyphosate.

Methods. The effectiveness of three chemical control schemes was studied from 2021 to 2025 in the Forest-Steppe zone of Ukraine. Herbicides based on triasulfuron, dicamba, and glyphosate were tested. Effectiveness was assessed by measuring the toxic effect on plants, reduction in biomass, number of viable shoots, and the weed's ability to regenerate. Observations covered the growing season and analyzed long-term effects of herbicide application.

Results. The highest effectiveness was shown by the herbicide Lintur 70 WG, containing triasulfuron and dicamba. It caused up to 94.3 percent plant death and minimal regeneration during the season. Herbicides based on glyphosate and dicamba alone were less effective, particularly in long-term control and root suppression. The use of Lintur 70 WG significantly reduced *Solidago canadensis* density and lowered the risk of repeated proliferation.

Conclusions. The results indicate that the combination of triasulfuron and dicamba is suitable for effective control of *Solidago canadensis* in agricultural lands. These findings can serve as a basis for practical recommendations for chemical protection of crops, aimed at maintaining productivity and ecological stability of phytocenoses.

KEYWORDS: dicamba, glyphosate, invasive weeds, phytotoxicity, triasulfuron

Як цитувати: Korpita H. M., Shuvar I. A. Control of *Solidago canadensis* L. using various herbicide protection schemes. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2026. Вип. 45. С. 221–228. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-17>

In cites: Korpita, H. M., & Shuvar, I. A. (2026). Control of *Solidago canadensis* L. using various herbicide protection schemes. *Man and Environment. Issues of Neoecology*, (45), 221–228. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-17>

Introduction

Invasive weeds pose one of the most serious threats to phytocenoses, biodiversity of natural habitats, and the economic stability of agricultural production. The spread of alien plant species leads to profound structural and functional changes in plant communities, disrupts ecological balance, and reduces the productivity of agricultural landscapes. In many regions of the world, invasive plants are considered one of the key drivers of biodiversity loss and habitat degradation, as they compete with native species for resources such as light,

water, nutrients, and space. As a result, natural phytocenoses are transformed, the species composition of plant communities changes, and the benefits provided by natural vegetation may decline significantly [1-2].

One of the most aggressive alien species in Ukraine is *Solidago canadensis* L., a perennial herbaceous plant belonging to the Asteraceae family. This species originates from North America but has rapidly expanded across Europe and Asia during the last decades. *Solidago canadensis* is characterized by high ecological

plasticity, rapid vegetative propagation through rhizomes, and abundant seed production. These biological features enable the species to colonize a wide range of habitats, including agricultural lands, abandoned fields, forest edges, riverbanks, roadsides, and disturbed areas. The plant forms dense monodominant stands that suppress the growth and development of native vegetation, thereby significantly reducing species diversity within invaded communities [3-4].

The spread of *Solidago canadensis* causes significant ecological and economic consequences. In natural habitats, the species displaces native plants and alters the structure of plant communities, which ultimately leads to a decline in biodiversity. In agricultural landscapes, the invasion of this species contributes to a decrease in the productivity of forage lands, deterioration of pasture quality, and an increase in the costs associated with weed control [5]. Dense stands of *S. canadensis* can also negatively affect soil properties and nutrient cycling processes, leading to long-term degradation of invaded areas. In addition, the species demonstrates strong competitive ability that further inhibits the germination and growth of surrounding plants [6].

Control of *Solidago canadensis* is complicated by its high ecological plasticity and adaptability to various environmental conditions. The species demonstrates considerable tolerance to drought, soil nutrient fluctuations, and anthropogenic disturbances [7]. Moreover, the presence of a well-developed rhizome system allows plants to rapidly regenerate after mechanical removal or partial damage. These biological characteristics significantly reduce the effectiveness of traditional mechanical or agrotechnical control methods and necessitate the use of integrated management strategies aimed at limiting the spread of the species and suppressing its vegetative regeneration [8-9].

Among available control methods, chemical protection remains one of the most effective approaches to reducing the abundance of *Solidago canadensis*, especially in areas with high levels of infestation. Herbicides with systemic action are capable of penetrating plant tissues and translocating to the root system, which increases the likelihood of complete plant destruction and prevents subsequent regrowth. However, the efficiency of herbicide treatments largely depends on the active ingredients used, the growth stage of the weed, environmental conditions, and the application method. Therefore, the selection of

effective herbicides with a high level of systemic activity is of critical importance for successful control of invasive weeds in agricultural and semi-natural ecosystems [10].

In Ukraine, the problem of invasive plants is becoming particularly urgent due to significant anthropogenic transformation of landscapes and a high level of disturbance of natural habitats. Numerous alien species, including *Solidago canadensis*, *Heracleum sosnowskyi*, and *Ambrosia artemisiifolia*, are actively spreading in forest areas, roadsides, arable lands, and urban landscapes. Their proliferation leads to the displacement of native species, a decrease in biodiversity, disruption of soil cover, and alteration of key ecological processes [11-12]. This, in turn, affects the productivity of agricultural lands, increases the costs of plant protection and weed control, and poses a threat to natural landscapes and the conservation of rare flora. Thus, research on invasive species and the development of effective control methods are of great importance for maintaining ecological stability and economic sustainability of agroecosystems in Ukraine [13-14].

Invasive weeds not only threaten biodiversity and agricultural productivity but also disrupt ecological functions that provide essential services to humans. The invasion of alien plants, such as *Solidago canadensis*, can alter nutrient cycling, soil microbial communities, and hydrological regimes, which in turn affects resilience and stability of natural habitats. Changes in soil structure and chemistry caused by dense stands of invasive plants may reduce the suitability of areas for native species and hinder the restoration of natural plant communities. Consequently, the ecological impact of invasive species extends beyond the immediate displacement of native flora and encompasses long-term alterations in fundamental ecological processes [15-16].

Furthermore, the economic consequences of invasive plants are substantial and multifaceted. In phytocenoses, infestations by *Solidago canadensis* increase production costs due to additional labor, machinery use, and chemical inputs required for control. Infested pastures and meadows often show reduced forage quality and biomass yield, leading to lower livestock productivity. In semi-natural landscapes, tourism and recreational value may decline as invasive stands replace aesthetically and ecologically valuable native vegetation. Quantifying these

ecological and economic impacts is essential for prioritizing management interventions and allocating resources efficiently [17].

Finally, the rapid spread of *Solidago canadensis* highlights the need for region-specific management strategies that consider local environmental conditions and the biology of the species. Climatic factors, soil fertility, land use patterns, and disturbance regimes all influence the success of invasive plant control. Integrated approaches, combining mechanical, chemical, and preventive measures, are increasingly recommended, but their implementation requires detailed knowledge of weed growth dynamics, regeneration potential, and herbicide efficacy under local conditions. Therefore, research aimed at evaluating the comparative effectiveness of

different herbicidal treatments provides critical information for designing sustainable and evidence-based control programs [18].

The aim of this study is to assess the effectiveness of three herbicide protection schemes against *Solidago canadensis* L. using preparations based on dicamba, triasulfuron, and glyphosate. A comparative analysis of their influence on weed vegetative mass, the dynamics of biomass reduction, and the potential for plant recovery after treatment was conducted. The results obtained can serve as a scientific basis for developing practical recommendations for chemical weed control and improving management strategies aimed at limiting the spread of *Solidago canadensis* in the northern and central regions of Ukraine.

Materials and Methods

Studies to assess the effectiveness of chemical control of *Solidago canadensis* L. were conducted in 2021–2024 in the Forest-Steppe zone of Ukraine. The soils of the experimental plot are gray forest medium loam, with a humus content of 2.6%, pH of the salt extract is 6.1. The area of the accounting plot is 125 m², the number of

repetitions is three, the placement of variants is by the method of complete randomization (Fig. 1).

The areas of herbicide application include natural, semi-natural, and ruderal sites (abandoned plots), where the control of *Solidago canadensis* can be carried out with minimal risk to other plant species.

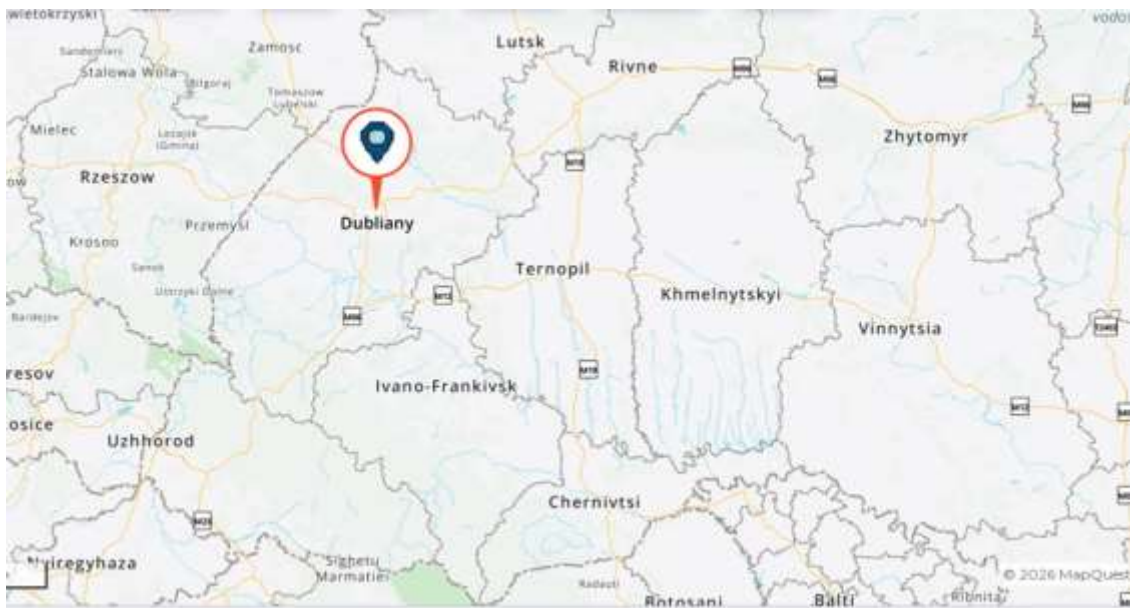


Fig. 1 – Location of the research area

Before treatment, weeds were counted by the number of plants per 1 m² and by phenophases of development. At the time of application of the preparations, *Solidago canadensis* plants were in the phase of active vegetative growth (30–50 cm in height). The study compared three herbicide protection schemes (Table 1).

The treatment was carried out using a manual knapsack sprayer at an air temperature of +20–+23°C, humidity of 65–70% and wind speed of no more than 2 m/s. The working solution consumption rate was 300 l/ha. The assessment of the effectiveness of herbicides was carried out visually using the EWRC

Table 1

**Herbicide protection schemes for the control
of *Solidago canadensis* L.**

Variant	Herbicide	Consumption rate, kg/ha or l/ha	Active ingredient(s)	Active ingredient content
I	Lintur 70 WG	0,3 kg/ha	Triasulfuron	41 g/kg
			Dicamba (sodium salt)	659 g/kg
II	Dianate BASF	1,5 l/ha	Dicamba	480 g/l
III	Roundup Max	4,0 l/ha	Glyphosate (potassium salt)	551 g/l (equiv. 450 g/l)

(European Weed Research Council) scale on the 7th, 14th, 28th and 42nd day after treatment. Additionally, the following were taken into account: a decrease in the number of viable shoots per 1 m²; the degree of suppression of aboveground biomass; the percentage of plant

death; signs of plant regeneration on the 60th day.

Statistical processing of the results was carried out by the method of variance analysis using the LSD_{0.05} significance criterion. Averaged data are presented with an indication of the standard deviation.

Results and Discussion

The results presented demonstrate differences in the effectiveness of the studied herbicides in suppressing *Solidago canadensis* L. over the observation period. Seven days after application, the highest level of plant suppression was recorded in the treatment with Lintur 70 WG, where the effectiveness reached 63.5%. During the same period, Roundup Max provided a suppression level of 52.1%, while Dianate BASF showed the lowest initial effect at 47.8%. This indicates a faster initial action of Lintur 70 WG compared with the other herbicides.

Fourteen days after treatment, the effectiveness of all herbicides increased considerably. The highest values were again observed in the variant with Lintur 70 WG (78.7%), confirming its high biological activity against the studied species. In the treatment with Roundup Max, plant suppression reached 73.4%, whereas Dianate BASF provided 69.6% effectiveness. Although the differences between the herbicides became slightly smaller at this stage, Lintur 70 WG still demonstrated the best performance.

On the 28th day after application, the effectiveness of the herbicides continued to increase. The highest suppression level was recorded for Lintur 70 WG (84.3%). Slightly lower values were observed for Roundup Max (82.6%), indicating high but somewhat slower activity of this herbicide. In contrast, Dianate BASF reached 74.1%, reflecting a more moderate level of effectiveness compared with the other treatments.

The maximum effectiveness values were recorded 42 days after herbicide application. In the treatment with Lintur 70 WG, plant suppression reached 91.8%, indicating the highest biological efficiency against *Solidago canadensis* L. Roundup Max ensured 84.7% suppression of plants, demonstrating stable and relatively high effectiveness throughout the entire observation period. The lowest values remained in the Dianate BASF treatment (79.3%), although this herbicide also provided a substantial reduction in the viability of the invasive species population (Table 2).

Table 2

**Effectiveness of herbicides against *Solidago canadensis* L.
in dynamics, %**

Variant	Herbicide	7 days	14 days	28 days	42 days
I	Lintur 70 WG	63,5 ± 2,3	78,7 ± 3,1	84,3 ± 2,8	91,8 ± 3,5
II	Dianate BASF	47,8 ± 2,3	69,6 ± 3,1	74,1 ± 2,8	79,3 ± 3,5
III	Roundup Max	52,1 ± 2,3	73,4 ± 3,1	82,6 ± 2,8	84,7 ± 3,5

Overall, the results indicate that all studied herbicides are capable of effectively suppressing *Solidago canadensis* L., but their action differs in

both the speed and level of biological effectiveness. Lintur 70 WG proved to be the most effective herbicide, providing the highest level of

plant suppression throughout the study period. Roundup Max showed high but slightly slower activity, while Dianate BASF demonstrated comparatively lower effectiveness.

Analysis of the data presented in Figure 1 shows a significant difference in the effectiveness of the studied herbicides in controlling *Solidago canadensis* 60 days after treatment. The highest results are demonstrated by Lintur 70 WG: the reduction in the number of shoots is 88%, the suppression of aboveground biomass is 91.2%, and the death of plants reaches 89.6%. The data confirm the high activity of the drug both in the destruction of the aboveground part of the weed and in the reduction of the regeneration ability - only 2-3 new plants per square meter.

Roundup Max showed average effectiveness. The reduction in the number of shoots was 71%, the biomass was suppressed by 77.4%, and the death of plants was at the level of 73.1%. Despite a fairly good level of action,

noticeable signs of regeneration were observed - up to 5-7 new plants/m², which indicates a less deep effect on the root system compared to Lintur. The lowest efficiency was found by BASF's Dianat: shoot suppression was 63%, biomass - 68.5%, plant death - 64.7%, and regeneration ability remained the highest among all variants - up to 8-11 new plants per 1 m². This indicates an insufficient long-term effect of the drug on perennial weeds with a developed root system. Thus, among the studied herbicides, the most effective means of controlling *Solidago canadensis* L. was Lintur 70 WG, which provided comprehensive suppression of vegetative mass, a high level of weed death and minimal signs of regeneration on the active ingredients, their concentration and mechanism of action. (Fig. 1).

The results of the study confirm the significant difference in the effectiveness of herbicides in controlling (*Solidago canadensis* L.) depending on the active ingredients, their concentration and mechanism of action. The highest efficiency was demonstrated by the

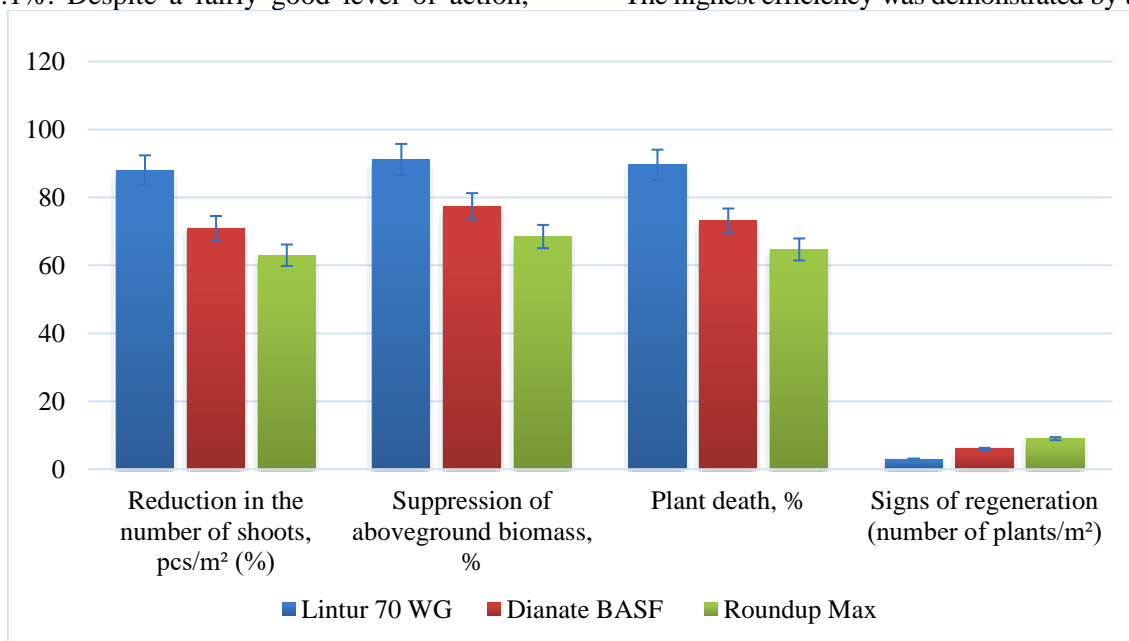


Fig. 1 – Comparison of herbicide effects on biomass, death, and recovery of *Solidago canadensis* L.

herbicide Lintur 70 WG, which includes triasulfuron (ALS inhibitor) and dicamba (synthetic auxin). The combination of two active ingredients with different mechanisms of action resulted in a powerful and long-lasting phytotoxic effect on the weed, including the root system, which ensured stable control of *S. canadensis*, which was manifested in a high percentage of plant death, a significant decrease in biomass and a slight regeneration ability even 60 days after treatment. Roundup Max, which contains glyphosate, was somewhat less effective. Although the initial

phytotoxic effect was noticeable, over time, partial recovery of plants was observed, which is explained by the lower ability of the drug to completely penetrate the perennial root system of *Solidago canadensis*. This result is consistent with well-known data on the decrease in the effectiveness of glyphosate in the fight against aggressive transient and perennial weeds. Dianat BASF with a single active ingredient, dicamba, showed the lowest effectiveness. Although dicamba has the ability to suppress a wide range of dicotyledonous weeds, in the case of *Solidago canadensis* its

effect was insufficient for long-term control. This indicates the need to combine dicamba with other active ingredients to achieve a deeper effect on the root system and reduce the regeneration capacity.

All three herbicides showed phytotoxic effect in the early stages after treatment, however, only in the conditions of variant I it was possible to provide stable control and minimize regrowth of the weed. Accordingly, for effective chemical protection of natural and semi-natural lands infested with *Solidago canadensis*, it is advisable to use preparations with multicomponent composition and different mechanisms of action.

Comparison of the obtained results with recent studies confirms the general patterns of herbicidal control effectiveness against *Solidago canadensis* L., while highlighting the significant role of the mode of action of the herbicides and their influence on interspecific competition and plant regeneration.

In the study [19], it was shown that *Solidago canadensis* exhibits higher tolerance to glyphosate compared to native species, and increasing the herbicide dose may even enhance its competitive advantage. Our results partially agree with these findings: although Roundup Max demonstrated relatively high effectiveness (84.7%), considerable plant regeneration was observed. This indicates that glyphosate does not provide complete control of *S. canadensis* and may leave viable underground organs.

Similar results were reported by T. Rajdus [20], who demonstrated that glyphosate application alters interspecific competition and

does not always reduce the invasive potential of *Solidago canadensis*, and in some cases may even promote its dominance. This explains the insufficient long-term effectiveness of glyphosate and the observed regrowth after its application in our study.

In the study [21] was shown that even with glyphosate use, a significant reduction in biomass and physiological activity of *S. canadensis* does not guarantee complete plant eradication, and effectiveness is considerably increased only when combined with other agents. In particular, a decrease in root biomass by 26–81% was reported. This is consistent with our results, where the highest effectiveness was achieved using the combined herbicide Lintur 70 WG, which affected both the aboveground and underground parts of the plant.

The findings of Chun-Feng [22] also confirm that controlling *Solidago canadensis* under natural conditions is challenging and requires a systematic approach, as a single herbicide application does not provide stable long-term control. This aligns with our results for Dianate BASF, which showed the lowest effectiveness and the highest level of plant regeneration.

The obtained results clearly demonstrate the advantage of combined herbicides. The high effectiveness of Lintur 70 WG confirms the need for a comprehensive impact on the physiological processes of plants. This ensures not only rapid suppression of *Solidago canadensis* but also a significant reduction in its regenerative capacity over the long term.

Conclusion

The study confirmed that the effectiveness of chemical control of invasive perennial plants, such as *Solidago canadensis* L., is largely determined by the composition of active substances and the mechanisms of action of the drugs. The most stable and long-lasting effect is achieved by the use of herbicides with a combined composition, which affect not only the above-ground part of the plant, but also its root system. The biological characteristics of the species, in particular the ability to vegetative

reproduction and rapid regeneration after damage, significantly affect the effectiveness of control methods, which emphasizes the need for an integrated approach. Chemical protection should be considered as part of a comprehensive strategy for managing invasive weeds, combined with agrotechnical and mechanical measures, which allows minimizing the risk of regeneration and contributes to the long-term restoration of local plant communities after the invasion of an aggressive species.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this manuscript. In addition, the authors have fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and duplicate publication.

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

AI Statement

In this study, generative artificial intelligence was not used

References

1. Bang, A., Cuthbert, R. N., Haubrock, P. J., Fernandez, R. D., Moodley, D., Diagne, C., Turbelin, A. J., Renault, D., Dalu, T., & Courchamp, F. (2022). Massive economic costs of biological invasions despite widespread knowledge gaps: A dual setback for India. *Biological Invasions*, 24, 2017–2039. <https://doi.org/10.1007/s10530-022-02780-z>
2. Dakhil, M. A., El-Keblawy, A., El-Sheikh, M. A., Halmy, M. W. A., Ksiksi, T., & Hassan, W. A. (2021). Global invasion risk assessment of *Prosopis juliflora* at biome level: Does soil matter? *Biology*, 10, 203. <https://doi.org/10.3390/biology10030203>
3. García-Mozo, H. (2024). Assessment of the diversity, abundance and range of invasive alien plant species in Córdoba, a Mediterranean urban area. *Diversity*, 16, 777. <https://doi.org/10.3390/d16120777>
4. Khan, A. M., Li, Q., Saqib, Z., Khan, N., Habib, T., Khalid, N., Majeed, M., & Tariq, A. (2022). MaxEnt modelling and impact of climate change on habitat suitability variations of economically important chilgoza pine (*Pinus gerardiana* Wall.) in South Asia. *Forests*, 13, 715. <https://doi.org/10.3390/f13050715>
5. Lipińska, N., Lipiński, W., Shuvar, I., Korpita, H., & Shuvar, A. (2023). Invasive species of plants and their threat to biodiversity. *Plant and Soil Science*, 14(1), 51–66. <https://doi.org/10.31548/plant1.2023.51>
6. Szabó, A.-K., Bálint, J., Molnár, A., Aszalos, S. E., Fora, C. G., Loxdale, H. D., & Balog, A. (2022). Associational susceptibility of crop plants caused by the invasive weed Canadian goldenrod, *Solidago canadensis*, via local aphid species. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10, 1080599. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.1080599>
7. Nagabhushan Arun, M., Mahender Kumar, R., Sreedevi, B., Padmavathi, G., Revathi, P., Pathak, N., & Venkatanna, B. (2023). The rising threat of invasive alien plant species in agriculture. *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.106742>
8. Rai, P. K., & Singh, J. S. (2020). Invasive alien plant species: Their impact on environment, ecosystem services and human health. *Ecological Indicators*, 111, 106020. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.106020>
9. Rashid, I., Haq, S. M., Lembrechts, J. J., Khuroo, A. A., Pauchard, A., & Dukes, J. S. (2021). Railways redistribute plant species in mountain landscapes. *Journal of Applied Ecology*, 58, 1967–1980. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13961>
10. Szabó, A.-K., Bálint, J., Molnár, A., Aszalos, S.E., Fora, C.G., Loxdale, H.D. and Balog, A. (2022) Associational susceptibility of crop plants caused by the invasive weed Canadian goldenrod, *Solidago canadensis*, via local aphid species. *Front. Ecol. Evol.* 10, 1080599. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.1080599>
11. Shuvar, I., Korpita, H., Balkovskiy, V., Shuvar, A., & Kropyvnytskyi, R. (2021). *Asclepias syriaca* L. is a threat to biodiversity and agriculture of Ukraine. *BIO Web of Conferences*, 36, 07010 <https://doi.org/10.1051/bioconf/20213607010>
12. Shuvar, I., Korpita, H., Shuvar, A., Shuvar, B., & Kropyvnytskyi, R. (2021). Invasive plant species and the consequences of its prevalence in biodiversity. *BIO Web of Conferences*, 31, 00024. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20213100024>
13. Semchuk, N. N., & Balun, O. V. (2020). Development of a biological method to control the poisonous weed plant *Heracleum sosnowskyi* Manden. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 613, 012132. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/613/1/012132>
14. Havryliuk, O.; Hovorukha, V.; Bida, I.; Gladka, G.; Tymoshenko, A.; Kyrylov, S.; Mariychuk, R.; Tashyrev, O. (2023). Anaerobic Degradation of the Invasive Weed *Solidago canadensis* L. (goldenrod) and Copper Immobilization by a Community of Sulfate-Reducing and Methane-Producing Bacteria. *Plants* 12, 198. <https://doi.org/10.3390/plants12010198>
15. Słowiński, K., Grygierzec, B., Synowiec, A., Tabor, S., & Araniti, F. (2022). Preliminary study of control and biochemical characteristics of giant hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) treated with microwaves. *Agronomy*, 12, 1335. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061335>
16. Sužiedelytė Visockienė, J., Tumelienė, E., & Maliene, V. (2020). Identification of *Heracleum sosnowskyi*-invaded land using earth remote sensing data. *Sustainability*, 12(3), 759 <https://doi.org/10.3390/su12030759>
17. Tiwari, S., Mishra, S. N., Kumar, D., Kumar, B., Vaidya, S. N., Ghosh, B. G., Rahaman, S. M., Khatun, M., Garai, S., & Kumar, A. (2022). Modelling the potential risk zone of *Lantana camara* invasion and response to climate change in eastern India. *Ecological Processes*, 11. <https://doi.org/10.1186/s13717-021-00354-w>
18. Rajdus, T., & Švehláková, H., & Plohák, P., & Stalmachova, B. (2020). Management of invasive species *Solidago canadensis* in Ostrava region (Czech Republic). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 444, 012046. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/444/1/012046>
19. Ye, X., Gu, C., Meng, J., Wu, M. (2025). Differences in the Response of Invasive *Solidago canadensis* and Native *Imperata cylindrica* to Glyphosate. *Plants*, 14, 2640. <https://doi.org/10.3390/plants14172640>
20. Rajdus, T. & Švehláková, H. & Plohák, P. & Stalmachova, B. (2020). Management of invasive species *Solidago canadensis* in Ostrava region (Czech Republic). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 444. 012046. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/444/1/012046>

21. Anas, M., Huang, Z.Y., Xiong, H., Imran, M., Yan, M.T., Javed, Q., Ren, G.Q., Qi, S.S., Li, J., Dai, Z.C., Du, D.L. (2025). Response of invasive *Solidago canadensis* to foliar application of natural herbicide and glyphosate. *J Environ Manage.* Nov;394:127522. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.127522>
22. Chun-Feng, G.U., Xiao-Qi, Y.E., Ming, W.U., Xue-Xin, S.H., Sheng-Wu, J. (2017). Effects of glyphosate on interspecific competition between *Solidago canadensis* and *Imperata cylindrica*[J]. *Chin J Plan Ecolo*, 2017, 41(4): 439-449.. <https://doi.org/10.17521/cjpe.2016.0331>

Submission received: 22.03.2026 / Revised: 24.04.2026 / Accepted: 30.04.2026 / Published: 30.05.2026

Г. М. КОРПИТА¹, канд. с/х наук,
дцент кафедри генетики, селекції та захисту рослин
e-mail: korpita@ukr.net ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0908-0129>

І. А. ШУВАР¹, д-р с/х наук, проф.,
професор кафедри технологій у рослинництві
e-mail: shuvaria@ukr.net ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4149-1761>
¹Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій
імені С.З. Гжицького

вул. В. Великого, 1, м. Дубляни, Львівська область, 80381, Україна

КОНТРОЛЬ *SOLIDAGO CANADENSIS* L. ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ РІЗНИХ СХЕМ ГЕРБИЦІДНОГО ЗАХИСТУ

Агресивне поширення інвазійної рослини *Solidago canadensis* L. становить серйозну загрозу фітоценозам України. Цей вид швидко колонізує території завдяки високій життєздатності кореневої системи та широкій екологічній адаптивності, що ускладнює боротьбу традиційними методами.

Мета. Оцінка ефективності трьох схем гербицидної обробки для боротьби з *Solidago canadensis* L. з використанням гербицидів на основі дикамби, триасульфурону та гліфосату.

Методи. Ефективність трьох схем хімічної боротьби вивчалася з 2021 по 2025 рік у Лісостеповій зоні України. Випробувані гербициди на основі триасульфурону, дикамби та гліфосату. Ефективність оцінено шляхом вимірювання токсичного впливу на рослини, зменшення біомаси, кількості життєздатних пагонів та здатності бур'яну до регенерації.

Результати. Найвищу ефективність показав гербицид Лінтур 70 WG, що містить триасульфурон та дикамбу. Це спричинило до 94,3% загибелі рослин та мінімальну регенерацію протягом сезону. Гербициди на основі гліфосату та дикамби окремо були менш ефективними, особливо в довгостроковому контролі та пригніченні коренів. Використання Lintur 70 WG значно зменшило щільність *Solidago canadensis* та знизило ризик повторного розмноження.

Висновки. Результати показують, що комбінація триасульфурону та дикамби підходить для ефективного контролю *Solidago canadensis* на сільськогосподарських угіддях. Дані висновки можуть слугувати основою для практичних рекомендацій щодо хімічного захисту сільськогосподарських культур, спрямованих на підтримку продуктивності та екологічної стабільності агроecosystem.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: дикамба, гліфосат, інвазійний бур'ян, фітотоксичність, триасульфурон

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

У цьому дослідженні не використовувався генеративний штучний інтелект.

Отримано: 22.03.2026 / Переглянуто: 24.04.2026 / Прийнято: 30.04.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

<https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-18>

УДК (UDC): 632.77:595.773.4:551.58(477.83)

О. І. КОВАЛЬЧУК¹, канд. с.-г. наук,

в.о. доцента кафедри генетики, селекції та захисту рослин

e-mail: oxanakovalchuk989@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8583-4877>

Ю. О. КОВАЛЬЧУК¹, канд. с.-г. наук,

доцент кафедри садівництва і овочівництва імені І. Гулька

e-mail: yurakovalchuk11@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0424-6038>

М. О. СТЮРКО¹, канд. с.-г. наук,

старший викладач кафедри генетики, селекції та захисту рослин

e-mail: m.styrko@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-1159-636X>

¹Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій
імені С. З. Гжицького

вул. В. Великого, 1, м. Дубляни, 80381, Україна

КЛІМАТИЧНІ ЧИННИКИ РОЗШИРЕННЯ *Drosophila suzukii* (Матсумура) ТА ПРОГНОЗ ФІТОСАНІТАРНОГО РИЗИКУ ДЛЯ ЯГІДНИЦТВА ЛЬВІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Мета. Оцінити вплив кліматичних змін на динаміку поширення інвазійного шкідника *Drosophila suzukii* (Matsumura, 1931) у Львівській області та прогнозувати фітосанітарний ризик для ягідництва регіону до 2030–2035 рр.

Методи. Аналіз трендів температурних показників за даними Львівської метеостанції (2001–2023 рр.); розрахунок сум активних (>10 °C) та ефективних температур; кліматичне прогнозування за сценаріями IPCC RCP4.5 і RCP8.5; моделювання кількості поколінь *D. suzukii* методом лінійної екстраполяції; оцінка потенційних економічних збитків для основних ягідних культур.

Результати. Встановлено, що за 2001–2023 рр. сума активних температур зросла на 270 °C·доба, кількість морозних днів (нижче –7 °C) скоротилась вдвічі. За сценарієм RCP4.5 до 2030–2035 рр. формуються умови для 4–5 поколінь *D. suzukii* на рік. Потенційні економічні збитки для ягідництва Львівщини оцінено у 284–339 млн грн/рік (RCP4.5) і 310–380 млн грн/рік (RCP8.5).

Висновки. Результати обґрунтовують необхідність запровадження регіональної системи фітосанітарного моніторингу та раннього реагування, включення *D. suzukii* до переліку карантинних організмів України й гармонізації вітчизняних фітосанітарних стандартів із нормами ЄС.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: кліматичні зміни, інвазійний шкідник, фітосанітарний ризик, прогнозування, ягідні культури, економічні збитки, RCP-сценарії

Як цитувати: Ковальчук О. І., Ковальчук Ю. О., Стюрко М. О. Кліматичні чинники розширення *Drosophila suzukii* (Матсумура) та прогноз фітосанітарного ризику для ягідництва Львівської області. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2026. Вип. 45. С. 229–236. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-18>

In cites: Kovalchuk, O. I., Kovalchuk, Yu. O., & Styrko, M. O. (2026). Climate drivers of *Drosophila suzukii* (Matsumura) spread and phytosanitary risk forecast for berry production in Lviv region. *Man and Environment. Issues of Neoeology*, (45), 229–236. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-18>

Вступ

Глобальне потепління є одним із ключових драйверів поширення інвазійних видів комах у вищих широтах [1]. Підвищення середньорічних температур

збільшує тривалість вегетаційного сезону, сприяє розширенню ареалів шкідників і зростанню кількості їхніх поколінь [2]. *Drosophila suzukii* (Matsumura,

© Ковальчук О. І., Ковальчук Ю. О., Стюрко М. О., 2026



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

1931) (Diptera: Drosophilidae) – інвазійний фітофаг, що завдає значних економічних збитків ягідникам Європи й Північної Америки [3]. Самця виду відкладає яйця безпосередньо в м'якоть дозріваючих плодів завдяки зазубреному яйцекладу – особливість, що відрізняє *D. suzukii* від інших дрозофіл і зумовлює її особливу небезпечність для садівників [3].

В Європі вид поширився надзвичайно швидко: перші осередки зафіксовано в Іспанії та Італії у 2008 р., а вже до 2015 р. шкідника виявлено майже в усіх країнах ЄС [6, 13]. Asplen et al. [6] встановили, що стрімка інвазія зумовлена широкою кормовою базою (понад 30 видів ягідних і кісточкових плодів), здатністю до швидкого нарощування популяцій за сприятливих умов і відсутністю спеціалізованих ентомофагів у нових ареалах. В Україні шкідник вперше зафіксований у 2014–2016 рр. у Закарпатті [4]. Оскільки Львівська область межує з Закарпатською та має схожий мезоклімат з польськими й словацькими регіонами, де *D. suzukii* вже закріпилась [13], регіональна оцінка фітосанітарного ризику є вкрай актуальною.

Важливим контекстом є те, що декілька авторів досліджували потенційні ареали *D. suzukii* в умовах кліматичних змін. Langille et al. [10] змоделивали розширення ареалу виду у Канаді відповідно до сценаріїв RCP4.5 і RCP8.5, довівши суттєве зростання площі придатних територій. Tait et al. [11] проаналі-

зували великомасштабні просторово-часові закономірності ураження плодів у Центральній Європі і встановили тісний зв'язок між кількістю поколінь шкідника та сумами ефективних температур. Shearer et al. [15] показали, що фенотипова пластичність *D. suzukii* – здатність утворювати зимову морфу – суттєво розширює можливості виду до переживання несприятливих зим у помірному кліматі. Ці дослідження підтверджують методологічну доцільність використання RCP-сценаріїв і сум ефективних температур для регіональних прогнозів, проте комплексного кількісного аналізу для Львівської області досі не проводилось.

Львівська область є одним з найбільших виробників ягід в Україні: площа під суницею садовою перевищує 12 000 га, під малиною – 3 800 га [5]. Водночас спостерігається відчутне потепління: середньорічна температура зросла з +7,6 °C (2001–2010) до +8,9 °C (2021–2023), що створює дедалі сприятливіші умови для натуралізації *D. suzukii* [6]. Враховуючи значну економічну цінність галузі та відсутність регіональної прогнозно-фітосанітарної моделі, ця тема є нагальною і недостатньо вивченою.

Мета – оцінити вплив кліматичних змін на динаміку поширення інвазійного шкідника *Drosophila suzukii* (Matsumura, 1931) у Львівській області та прогнозувати фітосанітарний ризик для ягідництва регіону до 2030–2035 рр.

Об'єкти та методи дослідження

Метеорологічні дані. Використовувано архівні дані Львівської метеорологічної станції за 2001–2023 рр.: середньодобові температури, кількість морозних днів ($T < -7$ °C), кількість активних днів ($T > 10$ °C). Суми активних температур (САТ) розраховано за формулою:

$$САТ = \Sigma (Т_{\text{середньодобова}} - 10 \text{ } ^\circ\text{C}) \text{ для } Т_{\text{середньодобова}} > 10 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

де $T_{\text{середньодобова}}$ – середньодобова температура повітря (°C). Суми ефективних температур (СЕТ) для оцінки кількості поколінь *D. suzukii* розраховували аналогічно, з порогом розвитку +10 °C та нормою на одне покоління 220 °C [8].

Кліматичні прогнози ґрунтуються на сценаріях IPCC AR6 [7]: **RCP4.5** (Representative Concentration Pathway 4.5 – сценарій з помірним радіаційним примусом +4,5 Вт/м²,

що характеризується поступовим зниженням викидів парникових газів після 2040 р.; зростання глобальної температури +0,4 °C/десятиліття) і **RCP8.5** (Representative Concentration Pathway 8.5 – сценарій з високим радіаційним примусом +8,5 Вт/м², що відповідає безперервному зростанню викидів без суттєвих обмежень; зростання температури до +0,7 °C/десятиліття) [7].

Кількість поколінь *D. suzukii* за кожен рік і прогнозний період розраховували як частку від ділення прогнозованої СЕТ на 220 °C. Прогноз СЕТ на 2030–2035 рр. отримано методом лінійної екстраполяції, відкаліброваної на фактичних даних 2001–2023 рр. із поправкою на приріст температури відповідно до кожного RCP-сценарію [7, 10].

Розрахунок економічних збитків. Потенційні економічні збитки (ПЕЗ, грн/рік) розраховували за формулою:

$$ПЕЗ = S \times У \times Ц \times П / 100 \quad (2)$$

де S – площа насаджень (га);

У – урожайність (т/га);

Ц – ціна реалізації (грн/т);

П – відсоток пошкодження врожаю (%).

Базові дані (площі насаджень і урожайність) взято зі статистичного збірника [5]. Ціни реалізації прийнято за даними Міністерства аграрної політики та продовольства України за 2022–2023 рр.: суниця – 45 тис. грн/т, малина – 52 тис. грн/т, чорниця

– 67 тис. грн/т. Відсотки пошкодження врожаю (П) прийнято на основі узагальнення літературних даних з Центральної Європи [9, 11].

Статистичну обробку виконано у програмі R 4.3.0 (пакети lm, stats). Для аналізу температурних трендів застосовано просту лінійну регресію (залежна змінна – річне значення показника, незалежна – рік). Достовірність трендів оцінювали за р-критерієм на рівні значущості $p \leq 0,05$.

Результати та обговорення

Кліматичні тренди і прогнози.

Аналіз даних Львівської метеостанції за 2001–2023 рр. виявив виражені позитивні тренди для всіх показників, важливих для розширення *D. suzukii* (табл. 1).

З аналізу даних табл. 1, сума активних температур зросла на 270 °C за два десятиліття, що математично відповідає реалізації додаткового покоління шкідника (норма розвитку одного покоління – 220 °C [8]). Виявлений тренд є статистично достовірним ($p < 0,05$). Кількість днів із температурами

нижче –7 °C зменшилася з 28 (2001–2010) до 14 (2021–2023), що суттєво поліпшує зимове виживання зимової морфи виду [15].

За помірним сценарієм RCP4.5 до 2030–2035 рр. очікується збільшення суми активних температур до 2500–2650 °C і скорочення зимового періоду, що створить умови для 4–5 поколінь *D. suzukii* на рік [10]. Це сумісно з даними для Баварії та Баден-Вюртембергу, де починаючи з 2014 р. систематично реєструється 4–5 поколінь [13]. За песимістичним сценарієм RCP8.5

Таблиця 1

Кліматичні параметри Львівської області (2001–2023) та прогноз до 2035 р.

Table 1

Climate parameters of Lviv region (2001–2023) and forecast until 2035

Показник /Indicator	2001–2010	2011–2020	2021–2023	Прогноз 2030–2035 / Forecast 2030–2035 (RCP4.5)
Середньорічна т-ра, °C / Average annual temperature, °C	+7,6	+8,1	+8,9	+9,3–+9,7
Сума акт. т-р (>10 °C), °C·доба / Amount of active temperature (>10 °C), °C·day	2050	2180	2320	2500–2650
Кількість днів T >15 °C (квіт.–жовт.) / Number of days T >15 °C (April–October)	82	94	108	120–130
Кількість днів T <–7 °C (зима) / Number of days T <–7 °C (winter)	28	21	14	8–12
Середньорічна кількість опадів, мм / Average annual precipitation, mm	694	712	728	740–760

прогнозує ще більш інтенсивний розвиток ситуації: до 2030–2035 рр. сума активних температур може досягти 2700–2900 °С, що теоретично дозволяє реалізацію 5–6 поколінь шкідника на рік і суттєво збільшить економічні ризики. Між двома сценаріями у горизонті 2030–2035 рр. різниця у сумах

активних температур складає 200–250 °С·доба, що відповідає додатковому неповному поколінню шкідника.

Економічна оцінка ризиків.

Розрахунок потенційних економічних збитків виконано за формулою (2) окремо для кожної культури і наведено в Таблиці 2.

Таблиця 2

Прогнозний фітосанітарний ризик *D. suzukii* для основних культур Львівщини (2030–2035 рр., сценарій RCP4.5)

Table 2

Predicted phytosanitary risk of *D. suzukii* for the main crops of Lviv region (2030–2035, RCP4.5 scenario)

Культура /Crop	Площа, га / Area, ha	Пошкодження, % / Damage, %	ПЕЗ, млн грн/рік / PED, mln UAH/year	Рівень ризику / Risk level	Критерії визначення рівня ризику / Criteria for determining the risk level
Суниця садова /Garden strawberries	12 400	60–80	148–197	Критичний /Critical	Усі три критерії несприятливі /All three criteria are unfavorable
Малина /Raspberry	3 800	55–75	42–57	Високий / High	Два з трьох критеріїв несприятливі / Two of three criteria are unfavorable
Чорниця / Blueberries	2 100	50–70	21–29	Високий / High	Два з трьох критеріїв несприятливі / Two of three criteria are unfavorable
Черешня кисла / Sour cherries	4 600	30–50	28–46	Середній / Medium	Один з трьох критеріїв несприятливий / One of three criteria is unfavorable
Смородина чорна / Blackcurrants	890	45–65	4–6	Середній / Medium	Один з трьох критеріїв несприятливий / One of three criteria is unfavorable
Виноград (ранні сорти) / Grapes (early varieties)	1 200	20–35	5–9	Низький–середній / Low–Medium	Менша чутливість культури / Less culture sensitivity

Рівень фітосанітарного ризику (табл. 2) визначено за сукупністю трьох критеріїв: (1) кліматична придатність регіону для розвитку шкідника (за прогнозованою СЕТ); (2) уразливість культури (за перевагами яйцекладки самиці [3, 6]); (3) економічна значущість потенційних збитків (обсяг галузі). Критичний рівень ризику присвоєно

при несприятливому поєднанні усіх трьох критеріїв, Високий – двох, Середній – одного.

Найвищий рівень ризику прогнозується для суниці садової: при площі 12 400 га і потенційному пошкодженні 60–80 % врожаю економічні втрати можуть сягнути 148–197 млн грн/рік. Разом із малиною і чорницею сумарні потенційні збитки для регіону складають 284–339 млн грн/рік за

сценарієм RCP4.5 та 310–380 млн грн/рік за RCP8.5. Подібні оцінки для європейських регіонів з аналогічними кліматичними параметрами складають 1,5–3,0 % ВВП аграрного сектору [11].

Система фітосанітарного контролю. На основі отриманих даних розроблено комплекс заходів фітосанітарного контролю (табл. 3). Ключовим елементом є включення

D. suzukii до переліку карантинних організмів України із відповідним фітосанітарним регламентуванням [12]. Терміни моніторингу (квітень–листопад) визначені фенологічним циклом шкідника: перші особини реєструються при стійкому прогріванні повітря понад +10 °С, що в умовах Львівщини відповідає початку квітня.

Таблиця 3

Рекомендована система фітосанітарного контролю *D. suzukii* для Львівської області

Table 3

Recommended phytosanitary control system for *D. suzukii* for Lviv region

Захід Event	Зміст / Content	Терміни та обґрунтування / Timeline and justification	Відповідальний орган / Responsible body
Моніторинг Monitoring	Атрактивні пастки (суміш яблучного оцту та червоного вина) на ягідних господарствах / Attractive traps (a mixture of apple cider vinegar and red wine) on berry farms	Квітень–листопад: перші дорослі особини з'являються при стійкому прогріванні понад +10 °С / April–November: the first adults appear when temperatures are consistently above +10 °С	Держпродспоживслужба [12] / State Service for Food and Consumer Protection [12]
Карантинна експертиза / Quarantine expertise	Обов'язкова сертифікація посадкового матеріалу ягідних культур / Mandatory certification of planting material of berry crops	Цілорічно: всі партії посадкового матеріалу при переміщенні між областями та ввезенні / Year-round: all batches of planting material when moving between regions and imported	Фітосанітарна служба [12] / Phytosanitary Service [12]
Інформування виробників / Informing producers	Щорічні практичні рекомендації щодо порогів шкідливості та строків обробки / Annual practical recommendations on harmfulness thresholds and processing times	Щороку (квітень): до початку льоту імаго / Every year (April): before the start of the adult flight	ЛНУВМБ ім. С.З. Гжицького, Інститут захисту рослин НААН / LNUVMB named after S.Z. Gzhytsky, Institute of Plant Protection of NAAS
Хімічний захист / Chemical protection	Випробування дозволених інсектицидів (спінторам, малатіон) згідно з реєстром пестицидів України / Testing of permitted insecticides (spintoram, malathion) according to the register of pesticides of Ukraine	Серпень–жовтень: пік льоту II–III поколінь, фаза дозрівання плодів / August–October: peak of the flight of the II–III generations, fruit ripening phase	Господарства – обробки; ЛНУВМБ – моніторинг резистентності [14] / Farms – treatment; LNUVMB – resistance monitoring [14]

Аналіз міжнародного досвіду засвідчує, що країни з аналогічними кліматичними показниками – Австрія, Німеччина (Баварія та Баден-Вюртемберг), Швейцарія – запровадили обов'язковий моніторинг *D. suzukii* ще у 2014–2016 рр. [13]. Обов'язкова фітосанітарна сертифікація посадкового матеріалу введена в ЄС у рамках регламенту ЄС 2016/2031. Цей досвід є актуальним орієнтиром для гармонізації вітчизняних фітосанітарних

стандартів в контексті євроінтеграції України.

Просторове картування фітосанітарних ризиків із застосуванням ГІС-методів є доведеним інструментом управління карантинними шкідниками в Центральній Європі [13].

Розробка такої карти для Львівської області є наступним логічним кроком у розвитку запропонованої системи моніторингу.

Висновки

Кліматичні тренди Львівської області свідчать про послідовне потепління: сума активних температур зросла на 270 °С·доба, кількість морозних днів скоротилась вдвічі – це критичні умови для прискорення інвазії *D. suzukii*.

До 2030–2035 рр. за сценарієм RCP4.5 прогнозується збільшення кількості поколінь шкідника до 4–5 на рік, за сценарієм RCP8.5 – до 5–6 поколінь. Потенційні економічні збитки для ягідництва Львівщини оцінюються у 284–339 млн грн/рік (за RCP4.5) та 310–380 млн грн/рік (за RCP8.5).

Більша реалістичність сценарію RCP4.5 для горизонту 2030–2035 рр. обґрунтована поточними тенденціями зміни кліматичної політики, тому він обраний як базовий для практичних рекомендацій.

Для мінімізації ризиків необхідно: запровадити регіональний фітосанітарний моніторинг *D. suzukii*, включити шкідника до переліку карантинних організмів України та запровадити обов'язкову сертифікацію посадкового матеріалу ягідних культур; гармонізувати вітчизняні фітосанітарні стандарти з регламентом ЄС 2016/2031.

Перспективними напрямками подальших досліджень є: просторове ГІС- картування фітосанітарних ризиків з урахуванням мікрокліматичних градієнтів регіону; вивчення природних ентомофагів *D. suzukii* в умовах Львівщини для розвитку програм біологічного контролю; моніторинг резистентності регіональних популяцій до інсектицидів.

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

У цьому дослідженні не використовувався генеративний штучний інтелект.

Список використаної літератури

1. Essl F., Dullä S., Dawson W. et al. Socioeconomic legacy yields an invasion debt. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2011. Vol. 108, № 1. P. 203–207. <https://doi.org/10.1073/pnas.1011728108>
2. Bebber D.P., Ramotowski M.A.T., Gurr S.J. Crop pests and pathogens move polewards in a warming world. *Nature Climate Change*. 2013. Vol. 3, № 11. P. 985–988. <https://doi.org/10.1038/nclimate1990>
3. Walsh D.B., Bolda M.P., Goodhue R.E. et al. *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae): invasive pest of ripening soft fruit. *Journal of Integrated Pest Management*. 2011. Vol. 2, № 1. P. G1–G7. <https://doi.org/10.1603/IPM10010>
4. Lavrinienko A., Kesäniemi J., Watts P.C. et al. First record of the invasive pest *Drosophila suzukii* in Ukraine. *Journal of Pest Science*. 2017. Vol. 90, № 2. P. 421–429. <https://doi.org/10.1007/s10340-016-0810-3>
5. Державна служба статистики України. Рослинництво України: статистичний збірник. Київ: Держстат, 2023. 214 с. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua> (дата звернення 15.03.2026)

6. Asplen M.K., Anfora G., Biondi A. et al. Invasion biology of spotted wing *Drosophila* (*Drosophila suzukii*): a global perspective. *Journal of Pest Science*. 2015. Vol. 88, № 3. P. 469–494. <https://doi.org/10.1007/s10340-015-0681-z>
7. IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. 2391 p. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
8. Kinjo H., Kunimi Y., Nakai M. Effects of temperature on the reproduction and development of *Drosophila suzukii*. *Applied Entomology and Zoology*. 2014. Vol. 49. P. 297–304. <https://doi.org/10.1007/s13355-014-0244-6>
9. Bolda M., Goodhue R.E., Zalom F.G. Spotted Wing *Drosophila*: Potential Economic Impact of a Newly Established Pest. *Giannini Foundation of Agricultural Economics*. 2010. Vol. 13, № 3. P. 5–8. https://s.giannini.ucop.edu/uploads/giannini_public/81/fe/81feb5c9-f722-4018-85ec-64519d1bbc95/v13n3_2.pdf
10. Langille A.B., Arteca E.M., Newman J.A. The impacts of climate change on the abundance and distribution of the spotted wing drosophila. *PLOS ONE*. 2017. Vol. 12, № 3. P. e0173582. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0173582>
11. Tait G., Grassi A., Pfab F. et al. Large-scale spatio-temporal patterns of *Drosophila suzukii* infestation in apple orchards. *Journal of Pest Science*. 2018. Vol. 91, № 2. P. 683–697. <https://doi.org/10.1007/s10340-018-0985-x>
12. Закон України «Про карантинний режим рослинницт'ва» № 3984-XII від 30.06.1993 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3984-12> (дата звернення 15.03.2026)
13. Cini A., Ioriatti C., Anfora G. A review of the invasion of *Drosophila suzukii* in Europe. *Bulletin of Insectology*. 2012. Vol. 65. P. 149–160. <https://www.bulletinofinsectology.org/pdfarticles/vol65-2012-149-160cini.pdf>
14. Mota-Sanchez D., Wise J.C. *Arthropod Pesticide Resistance Database*. Michigan State University, 2023. URL: <https://www.pesticideresistance.org>
15. Shearer P.W., West J.D., Walton V.M. et al. Seasonal cues induce phenotypic plasticity of *Drosophila suzukii*. *BMC Ecology*. 2016. Vol. 16. P. 11. <https://doi.org/10.1186/s12898-016-0070-3>

Отримано: 21.03.2026 / Переглянуто: 22.04.2026 / Прийнято: 29.04.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

O. I. KOVALCHUK¹, PhD (Agriculture),

Associate Professor of the Department of Genetics, Breeding and Plant Protection

e-mail: oxanakovalchuk989@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8583-4877>

Yu. O. KOVALCHUK¹, PhD (Agriculture),

Associate Professor of the I. Gulko Department of Horticulture and Vegetable Growing

e-mail: yurakovalchuk11@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0424-6038>

M. O. STIURKO¹, PhD (Agriculture),

Senior Lecturer of the Department of Genetics, Breeding and Plant Protection

e-mail: m.stiurko@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-1159-636X>

¹*Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies of Lviv*

1, Volodymyra Velykoho, Str., Dubliany, Lviv Oblast, 80831, Ukraine

CLIMATE DRIVERS OF *Drosophila suzukii* (*Matsumura*) SPREAD AND PHYTOSANITARY RISK FORECAST FOR BERRY PRODUCTION IN LVIV REGION

Purpose. To assess the impact of climate change on the dynamics of spread of the invasive pest *Drosophila suzukii* (*Matsumura*, 1931) in Lviv region and to forecast phytosanitary risk for berry production up to 2030–2035.

Methods. Analysis of meteorological trends using data from Lviv meteorological station (2001–2023); calculation of degree-day sums (SAT/SET); IPCC RCP4.5 and RCP8.5 scenario-based projection; linear extrapolation of generation number; calculation of potential economic losses for major berry crops.

Results. Over 2001–2023, the sum of active temperatures increased by 270 degree-days ($p < 0.05$), and the number of days with temperatures below -7 °C decreased twofold. Under the RCP4.5 scenario, conditions for 4–5 generations of *D. suzukii* per year will form by 2030–2035. Under RCP8.5, up to 5–6 generations are projected. Potential economic losses for berry production in Lviv Oblast are estimated at 284–339 million UAH/year (RCP4.5) and 310–380 million UAH/year (RCP8.5).

Conclusions. Results justify the establishment of a regional phytosanitary monitoring system with attractive trap networks, mandatory inclusion of *D. suzukii* in Ukraine's quarantine organism list, mandatory planting material certification, and harmonization of Ukrainian phytosanitary standards with EU Regulation 2016/2031.

KEY WORDS: *climate change, invasive pest, phytosanitary risk, forecasting, berry crops, economic losses, RCP scenarios*

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this manuscript. In addition, the authors have fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and duplicate publication.

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

AI Statement

In this study, generative artificial intelligence was not used

References

1. Essl, F., Dullä, S., Dawson, W. et al. (2011). Socioeconomic legacy yields an invasion debt. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(1), 203-207. <https://doi.org/10.1073/pnas.1011728108>
2. Bebber, D.P., Ramotowski, M.A.T., & Gurr, S.J. (2013). Crop pests and pathogens move polewards in a warming world. *Nature Climate Change*, 3(11), 985-988. <https://doi.org/10.1038/nclimate1990>
3. Walsh, D.B., Bolda, M.P., Goodhue, R.E. et al. (2011). *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae): invasive pest of ripening soft fruit. *Journal of Integrated Pest Management*, 2(1), G1-G7. <https://doi.org/10.1603/IPM10010>
4. Lavrinienko, A., Kesäniemi, J., Watts, P.C. et al. (2017). First record of the invasive pest *Drosophila suzukii* in Ukraine. *Journal of Pest Science*, 90(2), 421-429. <https://doi.org/10.1007/s10340-016-0810-3>
5. State Statistics Service of Ukraine (2023). Plant industry of Ukraine: statistical collection. Kyiv: Derzhstat, Retrieved from <https://www.ukrstat.gov.ua> (In Ukrainian)
6. Asplen, M.K., Anfora, G., Biondi, A. et al. (2015). Invasion biology of spotted wing *Drosophila* (*Drosophila suzukii*): a global perspective. *Journal of Pest Science*, 88(3), 469-494. <https://doi.org/10.1007/s10340-015-0681-z>
7. IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
8. Kinjo, H., Kunimi, Y., & Nakai, M. (2014). Effects of temperature on the reproduction and development of *Drosophila suzukii*. *Applied Entomology and Zoology*, 49, 297-304. <https://doi.org/10.1007/s13355-014-0244-6>
9. Bolda, M., Goodhue, R.E., & Zalom, F.G. (2010). Spotted Wing *Drosophila*: Potential Economic Impact of a Newly Established Pest. *Giannini Foundation of Agricultural Economics*. 13(3), 5-8. Retrieved from https://s.giannini.ucop.edu/uploads/giannini_public/81/fe/81feb5c9-f722-4018-85ec-64519d1bbc95/v13n3_2.pdf
10. Langille, A.B., Artea, E.M., & Newman, J.A. (2017). The impacts of climate change on the abundance and distribution of the spotted wing drosophila. *PLOS ONE*, 12(3), e0173582. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0173582>
11. Tait, G., Grassi, A., Pfab, F. et al. (2018). Large-scale spatio-temporal patterns of *Drosophila suzukii* infestation in apple orchards. *Journal of Pest Science*, 91(2), 683-697. <https://doi.org/10.1007/s10340-017-0912-z>
12. Law of Ukraine "On Phytosanitary Measures in Plant Production" No. 3984-XII of 30.06.1993. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3984-12> (In Ukrainian)
13. Cini, A., Ioriatti, C., & Anfora, G. (2012). A review of the invasion of *Drosophila suzukii* in Europe. *Bulletin of Insectology*, 65, 149-160.
14. Mota-Sanchez, D., & Wise, J.C. (2023). *Arthropod Pesticide Resistance Database*. Michigan State University. Retrieved from <https://www.pesticideresistance.org>
15. Shearer, P.W., West, J.D., Walton, V.M. et al. (2016). Seasonal cues induce phenotypic plasticity of *Drosophila suzukii*. *BMC Ecology*, 16, 11. <https://doi.org/10.1186/s12898-016-0070-3>

Submission received: 21.03.2026 / Revised: 22.04.2026 / Accepted: 29.04.2026 / Published: 30.05.2026

<https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-19>

УДК (UDC): 378.01:374.7:004.8:504

А. А. КЛІЩ¹, канд. географ. наук
доцент кафедри екологічного моніторингу та заповідної справи
e-mail: klieshch@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1379-1043>

О. Г. ШЕВЧЕНКО², д-р географ. наук, проф.,
заступник декана географічного факультету,
e-mail: shevchenko_olga@knu.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3915-427X>

Ю. В. ЯЦЕНКО²,
асистент кафедри метеорології та кліматології,
e-mail: juliayatsenko@knu.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3879-0848>

С. В. БУРЧЕНКО¹, PhD (Науки про Землю),
доцент кафедри екологічного моніторингу та заповідної справи
e-mail: s.burchenko@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5366-5397>

А. А. ГРЕЧКО¹, PhD (Науки про Землю),
доцент кафедри екологічного моніторингу та заповідної справи
e-mail: a.a.hrechko@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9987-2586>

І. О. КОСТИРКО²,
завідувач навчальної синоптичної лабораторії кафедри метеорології та кліматології,
e-mail: vanfildin@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8156-1920>

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

²Київський національний університет імені Тараса Шевченка
вул. Володимирська, 64/13, м. Київ, 01601, Україна

ХАКАТОН FRESH AIR 2026 ЯК ІНСТРУМЕНТ ФОРМУВАННЯ ІННОВАЦІЙНИХ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ: ДОСВІД УКРАЇНСЬКОЇ КОМАНДИ ПРОЄКТУ ERASMUS+ DOMANI

Мета. Висвітлити досвід підготовки та участі студентських команд Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна та Київського національного університету імені Тараса Шевченка у міжнародному хакатоні Fresh AIR 2026 у рамках проєкту Еразмус+ DOMANI та проаналізувати роль хакатону як інструменту неформальної освіти для формування інноваційних компетентностей у сфері зеленої економіки, екологічного моніторингу та сталого розвитку.

Результати. Представлено процес підготовки до хакатону, який включав: конкурсний відбір учасників (із 16 заявок відібрано 8 студентів для 2 команд від Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна та з 12 заявок – 8 студентів для 2 команд від Київського національного університету імені Тараса Шевченка); проведення заходів із тимблдіingu для налагодження командної взаємодії; менторський супровід та 48-годинний марафон розробки прототипів. Описано чотири створені проєкти: S.E.N.S.E. (інтелектуальна екосистема моніторингу енергоспоживання та акустичного навантаження), AgroImpact AI (платформа аналізу пошкоджених війною земель), AquaFire Climate System (екосистема управління водним балансом для запобігання пожежам), GreenX (платформа екологічного моніторингу з інтеграцією в «Київ Цифровий»). У хакатоні змагалися 37 команд з України та світу. Для верифікації результатів проведено опитування учасників (N=16), яке виявило високий рівень задоволеності участю в хакатоні: 87,5 % оцінили досвід як «добрий» або «відмінний», 100 % позитивно оцінили менторську підтримку, найбільший прогрес учасники відзначили в командній роботі (81,3 %) та критичному мисленні (62,5 %).

Висновки. Хакатон Fresh AIR 2026 засвідчив ефективність формату неформальної освіти для формування міждисциплінарних компетентностей: креативності, командної роботи, критичного мислення, екологічної свідомості, суспільної відповідальності, комунікативних навичок та стресостійкості. Цілеспря-

© Клещ А. А., Шевченко О. Г., Яценко Ю. В., Бурченко С. В., Гречко А. А., Костирко І. О., 2026



This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

моване командування сприяло психологічній сумісності, рольовій структурі та стресостійкості в умовах онлайн-навчання та безпекових загроз. Синергія формальної академічної підготовки та інтенсивних змагальних форматів у межах проєкту DOMANI є стратегічним напрямом підготовки фахівців, здатних ефективно реагувати на екологічні виклики воєнного та повоєнного часу.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *хакатон, Fresh AIR 2026, DOMANI, неформальна освіта, командування, екологічний моніторинг, штучний інтелект, компетентність*

Як цитувати: Клещ А. А., Шевченко О. Г., Яценко Ю. В., Бурченко С. В., Гречко А. А., Костирко І. О. Хакатон Fresh AIR 2026 як інструмент формування інноваційних компетентностей: досвід української команди проєкту Erasmus+ DOMANI. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології.* 2026. Вип. 45. С.237–251. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-19>

In cites: Klishch, A. A., Shevchenko, O. H., Yatsenko, Yu. V., Burchenko, S. V., Hrechko, A. A., & Kostyrko, I. O. (2026). The Fresh AIR 2026 hackathon as a tool for developing innovative skills: the experience of the ukrainian team from the Erasmus+ DOMANI project. *Man and Environment. Issues of Neoeology*, (45), 237–251. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-19>

Вступ

Сучасні глобальні виклики у сфері охорони довкілля, зумовлені зміною клімату, виснаженням ресурсів, втратою біорізноманіття та необхідністю переходу до сталого розвитку, а також – в українських реаліях – безпрецедентним впливом воєнних дій, вимагають від нової генерації фахівців не лише поглиблених фахових знань, а й здатності швидко інтегрувати міждисциплінарні підходи, працювати з великими масивами даних та створювати дієві технологічні рішення. У таких умовах традиційна формальна освіта, яка забезпечує фундаментальну підготовку, часто не встигає за динамікою технологічних, суспільних та екологічних змін. Натомість неформальна освіта – зокрема у форматі хакатонів, воркшопів та інтенсивних змагальних програм – стає ефективним інструментом формування прикладних компетентностей, командної роботи та інноваційного мислення.

Хакатони, які спочатку виникли в ІТ-середовищі, сьогодні успішно застосовуються в екологічній та соціальній сферах, дозволяючи за короткий час створити прототипи рішень для реальних проблем. Хакатони дедалі частіше використовуються в освітньому процесі як ефективний інструмент формування критичного мислення, командної роботи та екологічної свідомості [1–3], що підтверджується досвідом їхнього впровадження в міжнародних проєктах, зокрема Horizon Europe та Erasmus+ [4, 5].

Проєкт Еразмус+ «DOMANI – Розвиток екосистем мікрокваліфікацій в Україні та Монголії для конкурентоспроможної та стійкої зеленої економіки» має на меті розвиток гнучких, інклюзивних освітніх траєкторій для підготовки «агентів змін», здатних підтримувати сталу трансформацію своїх країн [6]. Цьогоріч українська команда проєкту DOMANI у якості офіційних партнерів долучилася до організації IV Міжнародного хакатону Fresh AIR 2026 [7], який об'єднав студентів, викладачів та експертів для пошуку рішень актуальних екологічних проблем (рис. 1).

Важливим складником підготовки до хакатону став досвід, отриманий в умовах, коли повномасштабна війна в Україні зумовила перехід освітнього процесу в закладах вищої освіти на змішаний, а іноді й повністю онлайн-формат навчання. У такому форматі значно скорочується частка безпосередньої міжособистісної взаємодії студентів, що ускладнює природне набуття навичок академічної комунікації та розвиток комунікативних soft skills. Саме тому інтеграція зусиль, спрямована на подолання соціальної ізоляції та формування навичок командної роботи, набуває критичного значення як інструмент компенсації дефіциту живої взаємодії.

Мета – проаналізувати ефективність хакатонів як інструменту неформальної освіти для формування інноваційних компетентностей на прикладі участі українських команд проєкту Erasmus+ DOMANI в міжнародному хакатоні Fresh AIR 2026.



Рис. 1 – Офіційні партнери хакатону на банері Fresh AIR 2026 [7]
Fig. 1 – Official partners of the hackathon on the Fresh AIR 2026 banner [7]

Об'єкт та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес підготовки та участі студентських команд закладів вищої освіти України (Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна та Київський національний університет імені Тараса Шевченка) у міжнародному хакатоні Fresh AIR 2026, організованому за підтримки проєкту Еразмус+ DOMANI.

За проєктом DOMANI доступ до програм навчання впродовж життя та мікрокваліфікацій реалізується через цільові канали: університетське менторство для студентів, стратегічні партнерства для бізнесу та відкриті заходи для широкої громадськості. Для практичного закріплення знань консорціум впроваджує комплексну програму активностей, одним з елементів якої є національні та міжнародні хакатони.

Реалізація практичного складника навчання закріплена за Робочим пакетом 3 (WP3) проєкту DOMANI, у межах якого заплановано проведення двох національних хакатонів – в Україні та в Монголії. Ці заходи покликані об'єднати академічну експертизу з творчим потенціалом учасників для розробки прикладних екологічних стратегій. Своєю чергою, міжнародний хакатон є частиною Робочих пакетів 5-6 і спрямований на фінальну

валідацію результатів проєкту на міжнародному рівні.

До участі у хакатоні залучаються команди студентів та молодих науковців від кожного закладу-партнера. Національний хакатон для українських партнерів був організований на базі Національного університету «Одеська політехніка» за фахової підтримки члена консорціуму ГО «Українське метеорологічне та гідрологічне товариство». Учасниками змагань стали представники Київського національного університету імені Тараса Шевченка та Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

Підготовка команд у кожному з двох університетів відбувалася автономно, однак за єдиним алгоритмом, визначеним проєктом DOMANI. До її складу входили: конкурсний відбір учасників (за критеріями мотивації, фахових навичок, відповідності тематиці та володіння англійською мовою), організація тимбилдингу та менторський супровід. Координацію підготовки в кожному закладі здійснювали призначений керівник і викладачі-ментори.

Методи дослідження включають: якісний аналіз освітнього процесу в межах хака-

тону; описовий метод для фіксації етапів підготовки та проведення; метод кейс-стаді для аналізу досвіду кожної команди; спостереження за діяльністю учасників – студентів та

менторів; аналіз конкурсної документації (мотиваційних листів, заявок); узагальнення результатів опрацювання звітної документації проєкту DOMANI.

Результати та обговорення

Підготовка та участь команд Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна та Київського національного університету імені Тараса Шевченка в міжнародному хакатоні Fresh AIR 2026 відбува-

лися в кілька послідовних етапів, які охоплювали як організаційно-методичну складову, так і безпосередню роботу зі студентами. Загальна хронологія подій мала такий вигляд (рис.2).



Рис. 2 – Таймлайн підготовки та участі у хакатоні Fresh AIR 2026.

Джерело: створено авторами за допомогою Notebook LM.

Fig. 2 – Timeline of preparation and participation in the Fresh AIR 2026 hackathon.

Source: Created by the authors using Notebook LM.

Методична підготовка та навчальний тренінг до хакатону. 4 березня 2026 року відбувся онлайн-тренінг «UA Hackathon Training DOMANI», присвячений опануванню сучасних методик проведення хакатонів. Спікерами виступили партнери проєкту DOMANI: *Аттіла Катоні* (Центр системних інновацій, Угорщина) та *Очір Алтансүх* (Національний університет Монголії).

Експерти презентували основи технології проведення хакатонів, поділилися практичними інсайтами щодо організації заходів у гібридному форматі (рис.3).

- Ключові аспекти тренінгу включали: використання інтерактивних онлайн-дошок для ефективного організації роботи віддалених команд;
- дієві вправи для налагодження взаємодії («айсбрейкінг-активності») для швидкого згуртування учасників;
- дієві вправи для налагодження взаємодії («айсбрейкінг-активності») для швидкого згуртування учасників;

- принципи формування команд та організації менторської підтримки;
- структурований робочий процес хакатону (ідентифікація викликів, визначення та дослідження проблеми, генерування ідей, доопрацювання рішення).

Активними учасниками тренінгу стали 11 представників українських організацій-партнерів DOMANI, що забезпечило методологічну узгодженість підготовчого етапу.

Відбір учасників. Відбір учасників від Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна здійснювався на конкурсних засадах. Критерії оцінювання, форма заявки (Google-форма), приклад мотиваційного листа та результати роботи конкурсної комісії наведено на рис. 4 (а–г відповідно).

До 16 березня 2026 року тривав прийом заявок: студенти подавали анкети з переліком навичок, досвіду та мотиваційні листи.

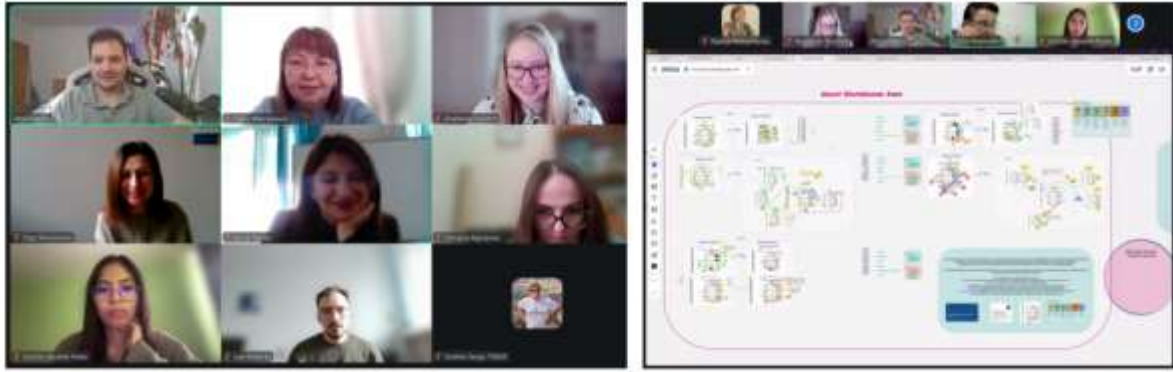


Рис. 3 – Онлайн-тренінг «UA Hackathon Training DOMANI» [8]
 Fig. 3 – Online training «UA Hackathon Training DOMANI» [8]



а) Критерії оцінювання;
 a) Assessment criteria;



б) Google-форма для відбору учасників;
 b) Google form for participant selection;



в) Мотиваційний лист учасника відбору;
 c) Participant's motivational letter;



г) Результати оцінювання конкурсної комісії.
 d) Results of the competition committee evaluation.

Рис. 4 – Етап відбору учасників команд до участі в хакатоні
 Fig. 4 – Stage of selection of team members for participation in the hackathon

Усього було подано 16 заявок, кожну з яких оцінювала конкурсна комісія з п'яти викладачів-учасників проєкту DOMANI (Г. Тітенко, Н. Максименко, С. Бурченко, А. Гречко, А. Клещ).

Оцінювання проводилося анонімно за чотирима блоками:

- мотиваційний лист (макс. 50 балів) – за десятьма критеріями (чіткість мотивації, рефлексія власного досвіду, усвідомлення цінності командної роботи тощо) за 5-бальною шкалою;
- фахові навички (макс. 12 балів);
- відповідність тематичним кластерам (макс. 18 балів);
- рівень володіння англійською мовою (макс. 20 балів).

За результатами оцінювання відібрано вісім найсильніших учасників, об'єднаних у дві команди: «Karazin EcoPunks» (Неоніла Вікторова, Дмитро Лаптев, Гліб Паршуков, Карина Редько) та «Green KaMinds» (Дмитро Доля, Дар'я Радченко, Анастасія Шевченко, Денис Пегашев).

Відбір учасників від Київського національного університету імені Тараса Шевченка здійснювався за аналогічною методологією. До 16 березня 2026 року кандидати подавали заявки на участь у хакатоні: студенти реєструвалися через спеціально розроблену Гугл-форму, в яку додавали свої резюме та мотиваційні листи. Всього було подано 12 заявок на участь. Подані заявки було розглянуто конкурсною комісією з викладачів-учасників проєкту DOMANI (С. Запотоцьким, С. Сніжком, О. Шевченко, Ю. Яценко, І. Кости́ком).

За результатами оцінювання було обрано вісім найсильніших учасників, які об'єдналися у дві команди: «MeteoShield» (Оксана Скляр, Деніс Савченко, Анна Буденна, Діана Брильова) та «Greenix» (Артур Лукасевич, Микола Ставничий, Олександра Даниліна, Денис Дячук).

Налагодження командної взаємодії: тімбілдінг. 28 березня 2026 року для відібраних учасників Каразинського університету було організовано захід із командування у Харківському зоопарку (рис.5). Захід було побудовано як командний квест із шести завдань. Із погляду неформальної освіти цей формат реалізував ключові принципи: навчання через дію та створення позитивного стресу в безпечному середовищі.

Методична цінність запропонованих вправ полягала в навмисному конструюванні ситуацій «безпечного абсурду» – умов, де учасники мають діяти спонтанно, не боячись помилитися. Кожне завдання виконувало специфічну функцію (табл. 1).

Після завершення квесту команди обрали власні назви та отримали менторський супровід: команду «Karazin EcoPunks» супроводжувала доцентка С. Бурченко, а команду «Green KaMinds» – доцентка А. Гречко. Ментори допомогли розподілити ролі відповідно до виявлених під час командування сильних сторін учасників.

25 березня 2026 року для відібраних студентів Київського національного університету імені Тараса Шевченка було організовано захід із командування на базі географічного факультету (рис.6).



Рис. 5 – Тімбілдінг учасників хакатону від Каразинського університету в Харківському зоопарку [9]

Fig. 5 – Teambuilding of hackathon participants from Karazin University at the Kharkiv Zoo [9]

Таблиця 1

Функціональне призначення вправ під час тимбілдингу

Table1

Functional purpose of exercises during team building

Завдання / Task	Функція / Function
«Стежка тигра» / «Tiger's Path»	Подолання соціальної інгібіції, зняття мовленнєвих затисків / Overcoming social inhibition, removing speech blocks
«Жираф'ячий баскетбол» та «Хоботна естафета» / «Giraffe Basketball» and «Trunk Relay»	Формування навичок невербальної координації, взаємного налаштування / Formation of non-verbal coordination skills, mutual adjustment
«Німа сцена з совою» / «Silent Scene with an Owl»	Розвиток емпатії, здатності розуміти партнера без слів / Developing empathy, understanding a partner without words
«Ему-забіг з перешкодами» / «Emu Obstacle Race»	Синхронізація рухів, спільне подолання перешкоди / Movement synchronization, joint overcoming of obstacles
«Синхронне позіхання з левами» / «Synchronous Yawning with Lions»	Створення ефекту спільного ритуалу завершення, посилення групової єдності / Creating the effect of a shared closing ritual, strengthening group unity



Рис. 6 – Тімбілдинг учасників хакатону від КНУ на базі географічного факультету
Fig. 6 – Teambuilding of hackathon participants from KNU at the Faculty of Geography

Програма тимбілдингу поєднувала елементи освітнього перегляду (наукові фільми та тренінги) із практичними вправами, спрямованими на виявлення індивідуальних і командних компетентностей учасників. Такий формат відповідав підходам неформальної освіти, зокрема принципам навчання через досвід та рефлексивного осмислення отриманих знань. Частина тимбілдингу ко-

манд Київського національного університету імені Тараса Шевченка відбувалася в укритті через повітряну тривогу (рис.6).

Методична цінність заходу полягала у поєднанні аналітичних та інтерактивних компонентів, що дозволило не лише сформувати базові навички командної взаємодії, а й здійснити первинну діагностику ролей учасників у команді. Особлива увага приді-

лялася вправам, які моделювали реальні ситуації прийняття рішень, комунікації та розподілу відповідальності. Зокрема, була використана авторська вправа «Кліматичний стартап», що передбачала роботу в малих групах над створенням концепції умовного екологічного проекту.

Учасникам пропонувалося за обмежений час:

- сформулювати ідею проекту;
- підготувати коротку презентацію (пітч);
- обґрунтувати актуальність і можливі шляхи реалізації.

У процесі виконання завдання студенти спонтанно розподіляли ролі відповідно до власних схильностей і сильних сторін. Спостереження за їхньою діяльністю дозволило ідентифікувати такі функціональні ролі:

- *капітан команди* – координував роботу групи, приймав ключові рішення;
- *пітчер* – презентував ідею, відповідав за комунікацію з аудиторією;
- *аналітик* – структурував інформацію, обґрунтовував доцільність проекту;
- *дизайнер* – оформлював візуальну складову презентації та креативну концепцію.

Додаткові вправи на самооцінку та групову рефлексію сприяли усвідомленню студентами власних ролей у команді та підвищенню рівня взаєморозуміння. Перегляд наукових відеоматеріалів і подальше їх обговорення дозволили закріпити теоретичні аспекти командної взаємодії та критичного мислення.

За результатами тимблдингу сформовано робочі команди зі збалансованим розподілом ролей. Такий підхід створив передумови для ефективної подальшої співпраці, підвищив рівень залученості учасників та сприяв розвитку їхніх комунікативних і організаційних компетентностей. Після завершення тимблдингу команди придумали власні назви та отримали менторський супровід: ментором команди «MeteoShield» стала асистентка кафедри метеорології та кліматології Юлія Яценко, а ментором команди «GreenX» став завідувач навчальною синоптичною лабораторією кафедри метеорології та кліматології Іван Костирко.

Участь у хакатоні Fresh AIR 2026 та його результати. Хакатон Fresh AIR 2026 відбувся з 2 по 4 квітня 2026 року в гібридному форматі на базі Національного

університету «Одеська політехніка» за сприяння ГО «Українське об'єднане метеорологічне та гідрологічне наукове товариство». У хакатоні змагалися 37 команд із різних міст України та світу.

Програма хакатону включала:

- лекції з пітчінгу та ораторського мистецтва;
- майстер-класи з оформлення презентацій;
- 48-годинний інтенсивний марафон розробки прототипів;
- фінальний пітчінг перед експертним журі.

Нижче подано короткий опис концепцій прототипів, розроблених командами-учасницями від проекту DOMANI під час 48-годинного хакатону.

Команда «Karazin EcoPunks» креативно підійшла до рішення міських проблем (рис.7) із концепцією прототипу системи S.E.N.S.E. (Smart-Energy & Noise Surveillance Ecosystem). На основі аналізу викликів команда запропонувала інноваційну міждисциплінарну концепцію, спрямовану на комплексне вирішення проблем урбанізованого середовища України в умовах енергетичного дефіциту та зростання шумового забруднення. Ідейна пропозиція системи S.E.N.S.E. передбачала впровадження автономних IoT-вузлів вуличного освітлення на основі сонячної енергії з адаптивною логікою (5% яскравості в стані спокою, 100% при детекції руху), що за попередніми оцінками команди дозволяє досягти економії до 80% енергії. Модуль Acoustic AI на основі нейронних мереж аналізує аудіосигнали у вигляді спектрограм, ідентифікуючи джерела шуму. Модуль Eco-Verdict трансформує зібрані дані у юридично значущі цифрові докази для електронного судочинства. Окремим компонентом є вертикальні зелені системи з роботизованими «Wallbots» для обслуговування рослин, що за задумом авторів забезпечують природне шумопоглинання (до 10 дБ).

Команда «Green KaMinds» працювала над розробкою концепції прототипу AgroImpact AI – це інтелектуальна GIS-платформа для автоматизованого моніторингу пошкоджених війною сільськогосподарських земель (рис.8). Запропонований алгоритм роботи системи включає: збір даних автономними БПЛА; комп'ютерний аналіз



Рис. 7 – Презентація проекту S.E.N.S.E. командою «Karazin EcoPunks»
Fig. 7 – Presentation of the S.E.N.S.E. project by the Karazin EcoPunks team



Рис.8 – Команда «Green KaMinds» під час розробки прототипу AgroImpact AI
Fig. 8 – The Green KaMinds team during the development of the AgroImpact AI prototype

для ідентифікації вирв та оцінки їх параметрів; інтелектуальну оцінку стану ґрунтового покриву за допомогою ШІ; інтеграцію в ГІС з накладанням на екологічні шари та дані Державного земельного кадастру. Потенційно очікувані результати, за розрахунками команди: скорочення часу аналізу на 70–90%, зниження витрат на моніторинг до 60%, можливість оперативного створення карт екологічного ризику.

Команда «MeteoShield» презентувала проект AquaFire climate system – концепцію інтелектуальної екосистеми превентивного управління водним балансом для запобігання ландшафтним пожегам (рис.9). За задумом учасників, серце системи — це предиктивна нейромережа, яка здійснює злиття даних (Data Fusion). Вона безперервно аналізує показники з наземних метеостанцій, датчиків вологості ґрунту та супутникових знімків. Система бачить повну картину: де

саме зараз посилюється вітер, де земля втратила останні запаси вологи і де рослинність досягла критичної межі зневоднення. Пропонована архітектура системи включає в себе 3 блоки:

- *Метеорологічний блок:* аналіз температурних трендів, кількості опадів, швидкості вітру;
- *Гідрологічний блок:* рівень ґрунтової вологи (IoT-сенсори), актуальний дебет річок та водосховищ;
- *Біофізичний блок:* супутникові індекси сухості рослинності (NDVI, NDWI).

На основі зібраних даних AquaFire генерує високоточну теплову карту гідрологічного дефіциту. Вона математично вираховує ймовірність займання для кожного гектара. У критичних зонах (навколо населених пунктів, уздовж автомагістралей або на межі цінних лісових масивів) пропонує розгорнати автономні IoT-системи зволоження.



Рис. 9 – Презентація проєкту AquaFire climate system командою «MeteoShield»
Fig. 9 – Presentation of the AquaFire climate system project by the «MeteoShield» team

Коли система фіксує критичний індекс сухості, вона автоматично розпилює воду, створюючи вологі буферні зони — екотони. Цей мікрокліматичний бар'єр фізично не дає вогню поширюватися. Система має два рівні доступу. Для державних органів — це потужний дашборд для прийняття рішень щодо управління водою та силами ДСНС. Для звичайних людей — це зрозумілий додаток або система сповіщень.

Команда «Greenix» за мету визначила розробку концепції цифрової платформи для міського моніторингу, що спрямована на виявлення та вирішення комунальних і екологічних проблем (рис.10). Основна ідея сервісу «GreenX» полягає в інтеграції зусиль громадян, бізнесу та комунальних служб шляхом створення єдиного середовища. Під час хакатону команда запропонувала ключову особливість платформи – застосування

механізму гейміфікації, зокрема системи бальних винагород (система лояльності), що стимулює мешканців до фіксації та усунення міських проблем, а також формування спільноти екологічно свідомих громадян (волонтерів). Гасло платформи: «GreenX – where data becomes action».

Функціонально концепція платформи передбачає можливість створення користувачами заявок із фіксацією проблеми, які обробляються із застосуванням технологій штучного інтелекту. Залежно від типу та пріоритетності звернення, система автоматично направляє заявки до відповідних комунальних служб, публікує їх у волонтерському модулі або передає на додаткову перевірку модераторам. Таким чином, очікується підвищення рівня громадянської залученості, оптимізація процесів обробки звернень та скорочення часу вирішення міських проблем.



Рис. 10 – Презентація проєкту GreenX командою «Greenix»
Fig. 10 – Presentation of the GreenX project by the «Greenix» team

4 квітня 2026 року відбувся фінальний пітчінг, на якому команди презентували свої прототипи перед експертним журі. За результатами оцінювання переможцями хакатону стали команди «Cold blood» (1 місце), «Future aid» та «fennec» (2 місце), «AI Cobot», «0x0I» та «Realphys» (3 місце), а також «Ecoglow», «Midgard», «asterics and abelics» та «Vadicam» (4 місце). Хоча команди проєкту DOMANI не потрапили до числа переможців, участь у хакатоні Fresh

AIR 2026 стала для студентів цінним практичним досвідом, а всі учасники отримали сертифікати [9,10]. Організатори проєкту DOMANI також підготували для команд спеціальні заохочувальні призи: для команд Харківського університету – екскурсію до флораріуму Ботанічного саду, а для команд Київського університету – інтерактивну екскурсію на Гідрологічну станцію «Київ» (Венеціанський острів, Гідропарк).

Обговорення

Аналіз підготовчого етапу та участі в хакатоні дозволив виокремити ключові компетентності, що формуються в такому форматі неформальної освіти, а також зіставити їх із конкретними етапами роботи команд. Зокрема:

- *Креативність* – здатність генерувати інноваційні ідеї в стислі терміни (48 годин) проявилася під час розробки концепцій чотирьох прототипів (S.E.N.S.E., AgroImpact AI, AquaFire, GreenX), кожен із яких пропонував нестандартне вирішення актуальних екологічних проблем;

- *Командна робота* – навички рольового розподілу, взаємодопомоги та синхронізації дій формувалися під час тимблдингів (квест в зоопарку, вправа «Кліматичний стартап») та безпосередньо в процесі 48-годинного марафону;

- *Критичне мислення* – оцінка власних рішень та аналіз зворотного зв'язку від експертів реалізовувалася через менторський супровід та підготовку до фінального пітчінгу;

- *Екологічна свідомість* – розуміння комплексності екологічних проблем (енергодефіцит, шумове забруднення, деградація земель від воєнних дій, лісові пожежі) та відповідальності за їх вирішення стала ключовим мотиватором для всіх чотирьох команд;

- *Суспільна відповідальність* – орієнтація розробок на реальні потреби громад та держави (інтеграція GreenX у «Київ Цифровий», підтримка ДСНС через AquaFire, юридично значущі докази в S.E.N.S.E.) свідчить про високий рівень соціальної зрілості студентів;

- *Комунікативні навички* – публічний захист проєктів, аргументація, робота з питаннями журі тренувалися під час лекцій з пітчінгу, майстер-класів та фінальної презентації;

- *Стресостійкість* – ефективна робота в умовах жорсткого таймінгу та інтенсивного навантаження (48 годин, обмежені технічні ресурси, робота в укритті під час повітряної тривоги для команди КНУ) стала окремим викликом, який команди успішно подолали.

Для верифікації цих висновків було проведено опитування учасників (16 студентів – по 8 від кожного університету). Результати засвідчили, що переважна більшість респондентів (понад 87,5 %) позитивно оцінили прозорість конкурсного відбору. Тімблдинг визнали надзвичайно корисним для згуртування команди 75 % учасників. Абсолютно всі студенти відзначили належну організаційну та менторську підтримку з боку університетів (100 %), зокрема надання безпечного приміщення та менторський супровід. При цьому опитані високо оцінили якість тренінгового контенту та доступність менторів (максимальний бал виставили 15 із 16 респондентів). Найбільш емоційним моментом для учасників став фінальний пітчінг перед журі (понад 31 % відповідей).

Водночас опитування виявило й певні проблемні зони організації хакатону. Логістика та таймінг отримали найбільший розкид оцінок – від «чудово» до «незадовільно», що свідчить про потребу оптимізації часових рамок у майбутніх проєктах. 37,5 % учасників зазначили, що їм бракувало часу на технічне опрацювання рішень. Незважаючи на це, загальний рівень задоволеності участю в проєкті DOMANI виявився дуже високим: 87,5 % респондентів оцінили свій досвід як «добрий» або «відмінний». Жоден учасник не висловив незадоволення.

До позитивних аспектів організації слід віднести: якісну методологічну підготовку, ефективну систему менторського супроводу, гібридний формат, що забезпечив доступність для учасників із різних регіонів,

а також високий рівень експертного журі. Недоліками можна вважати обмеженість часу на глибоке опрацювання технічних рі-

шень і недостатню інтеграцію між командами (переважно змагальний, а не колаборативний характер).

Висновки

Хакатон Fresh AIR 2026, організований у межах проєкту Еразмус+ DOMANI, засвідчив ефективність формату неформальної освіти для розвитку міждисциплінарних компетентностей студентів природничих спеціальностей. Участь у змаганні 37 команд з України та світу підтвердила зростаючий попит на подібні формати серед молоді.

Аналіз підготовчого етапу та участі в хакатоні дав змогу виокремити ключові компетентності, що формуються в такому форматі неформальної освіти: креативність (здатність генерувати інноваційні ідеї за 48 годин), командна робота (рольовий розподіл, взаємодопомога), критичне мислення (оцінка власних рішень та аналіз зворотного зв'язку), екологічна свідомість (розуміння комплексних екологічних проблем), суспільна відповідальність (орієнтація розробок на реальні потреби), комунікативні навички (публічний захист проєктів) та стресостійкість (робота в умовах жорсткого таймінгу та безпекових загроз). Результати опитування підтвердили, що учасники відзначили найбільший прогрес саме в командній роботі (81,3 %) та критичному мисленні (62,5 %).

Цілеспрямоване командування перед хакатоном зарекомендувало себе як дієвий інструмент підготовки студентів, які навчаються переважно онлайн. В обох університетах було використано різні, але ефективні формати: для команд Каразінського університету – квест у зоопарку, для команд Київського національного університету імені Тараса Шевченка – комбінацію освітнього перегляду та практичної вправи «Кліматичний стартап». Обидва підходи сприяли формуванню психологічної сумісності, рольової структури та стресостійкості; 75 % учасників визнали тимблдинг надзвичайно корисним для згуртування команди.

Розроблені студентськими командами проєкти (S.E.N.S.E., AgroImpact AI, AquaFire Climate System, GreenX) демонструють високий рівень інноваційності, орієнтацію на реальні екологічні виклики воєнного та повоєнного часу та потенціал для подальшого впровадження. Усі чотири концепції базуються на використанні штучного інтелекту, що свідчить про готовність студентів до роботи з сучасними технологіями.

Проведене опитування учасників (N=16) виявило високий рівень загальної задоволеності: 87,5 % респондентів оцінили свій досвід як «добрий» або «відмінний», а 100 % учасників позитивно оцінили менторську підтримку. Водночас 37,5 % студентів зазначили, що їм бракувало часу на технічне опрацювання рішень, що вказує на потребу в оптимізації часових рамок майбутніх хакатонів.

Синергія формальної академічної підготовки та інтенсивних змагальних форматів є стратегічним напрямом підготовки фахівців, здатних ефективно реагувати на екологічні виклики. Отриманий досвід може бути корисним для інших закладів вищої освіти, що планують долучати студентів до міжнародних хакатонів, а розроблені методики конкурсного відбору та тимблдингу можуть бути масштабовані в межах інших освітніх проєктів.

Автори висловлюють щире подяку **Аттілі Катоні (Attila Katona)** та **Очіру Алтансуху (Ochir Altansukh)** за проведення тренінгу, методологічну підтримку та педагогічне натхнення. Окрема подяка **Олегу Шаблію** та членам **ГО «Українське об'єднане метеорологічне та гідрологічне наукове товариство»** – за сприяння створенню платформи хакатону для інноваційної студентської творчості. Автори також дякують усім учасникам команд, які долучилися до підготовки та проведення заходу.

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

Використано ресурс штучного інтелекту Notebook LM для генерації окремого ілюстративного зображення. Автори несуть повну відповідальність за зміст, дані та висновки.

Список використаної літератури

1. Oyetade K. E., Zuva T., Harmse A. Educational benefits of hackathon: A systematic literature review. *World Journal on Educational Technology: Current Issues*. 2022. Vol. 14, No 5. P. 1122–1135. <https://doi.org/10.18844/wjet.v14i5.5678>
2. Costa G., García-Holgado A., Alvarez P. Systematic mapping of the literature on hackathons. *Frontiers in Education*. 2026. Vol. 10. Article 1701443. <https://doi.org/10.3389/educ.2026.1701443>
3. Schulten C., Chounta I.-A. How do we learn in and from Hackathons? A systematic literature review. *Education and Information Technologies*. 2024. Vol. 29. P. 20103–20134. <https://doi.org/10.1007/s10639-024-12645-6>
4. Barroso Quiroga M. M., Noheda A., Larrachea J. The Accelerathon as a catalyst for open innovation in urban sustainability. *E3S Web of Conferences*. 2025. Vol. 654. Article 03008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202565403008>
5. Aleksanyan A., Valentini A. Measuring the Impact of Challenge-Based Learning in a Social Hackathon: Case Study Results from the Eco-Digithon. *The Future of Education 15th Edition Conference Proceedings*. 2025. Pixel International Conferences. URL: https://conference.pixel-online.net/library_scheda.php
6. About DOMANI Project. *DOMANI Project – An official website of DOMANI Project*. URL: <https://domaniproject.eu/index.php/about/> (дата звернення: 16.04.2026).
7. Fresh AIR 2026. *AIR Institute*. URL: <https://www.airinstitute.in/events/fresh-2026-ua> (дата звернення: 16.04.2026).
8. Тренінг з організації онлайн-хакатонів за проектом Erasmus+ DOMANI. *Каразинський навчально-науковий інститут екології, зеленої енергетики та сталого розвитку*. URL: <https://ecology.karazin.ua/news/trening-z-organizacii-onlajn-hakatoniv-za-proiektom-erasmus-domani/> (дата звернення: 16.04.2026).
9. Дві команди, одна мета: «Karazin EcoPunks» та «Green KaMinds» — на міжнародному хакатоні за проектом DOMANI. *Каразинський навчально-науковий інститут екології, зеленої енергетики та сталого розвитку*. <https://ecology.karazin.ua/news/dvi-komandi-odna-meta-karazin-ecopunks-ta-green-kaminds-na-mizhnarodnomu-hakatoniv-za-proiektom-domani/> (дата звернення: 18.04.2026).
10. The Fresh AIR 2026 Hackathon was held in Ukraine. *DOMANI Project – An official website of DOMANI Project*. URL: <https://domaniproject.eu/index.php/the-fresh-air-2026-hackathon-was-held-in-ukraine/> (дата звернення: 18.04.2026).



Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or Erasmus+. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

Отримано: 15.04.2026 / Переглянуто: 16.05.2026 / Прийнято: 20.05.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

A. A. KLIESHCH¹, PhD (Geography),

Associate Professor of the Department of Environmental Monitoring and Protected Areas Management
e-mail: klieshch@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1379-1043>

O. H. SHEVCHENKO², DSc (Geography), Prof.,

Professor of the Department of Meteorology and Climatology
e-mail: shevchenko_olga@knu.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3915-427X>

YU. V. YATSENKO²,

Assistant of the Department of Meteorology and Climatology
e-mail: juliyatsenko@knu.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3879-0848>

S. V. BURCHENKO¹, PhD (Earth Sciences),

Associate Professor of the Department of Environmental Monitoring and Protected Areas Management
e-mail: s.burchenko@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5366-5397>

A. A. HRECHKO¹, PhD (Earth Sciences),

Associate Professor of the Department of Environmental Monitoring and Protected Areas Management
e-mail: a.a.hrechko@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9987-2586>

I. O. KOSTYRKO²,

Head of the Synoptic Training Laboratory of the Department of Meteorology and Climatology,
e-mail: vanfildin@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8156-1920>

¹*V. N. Karazin Kharkiv National University*

4, Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

²*Taras Shevchenko National University of Kyiv*

64/13, Volodymyrska Str., Kyiv, 01601, Ukraine

THE FRESH AIR 2026 HACKATHON AS A TOOL FOR DEVELOPING INNOVATIVE SKILLS: THE EXPERIENCE OF THE UKRAINIAN TEAM FROM THE ERASMUS+ DOMANI PROJECT

Purpose. To highlight the experience of student teams from V. N. Karazin Kharkiv National University and Taras Shevchenko National University of Kyiv in the international Fresh AIR 2026 hackathon under the Erasmus+ DOMANI project, and to analyse the role of the hackathon as a tool of non-formal education for developing innovative competencies in the fields of green economy, environmental monitoring and sustainable development.

Results. There presents the preparation process for the hackathon, which included: competitive selection (16 applications, from which 8 students were selected for 2 teams from V. N. Karazin Kharkiv National University; and 12 applications, from which 8 students were selected for 2 teams from Taras Shevchenko National University of Kyiv); conducting team-building activities to establish team interaction; mentoring support; and a 48-hour prototype development marathon. Four created projects are described: S.E.N.S.E. (intelligent ecosystem for monitoring energy consumption and acoustic load), AgroImpact AI (platform for analysing war-damaged lands), AquaFire Climate System (ecosystem for water balance management to prevent fires), GreenX (environmental monitoring platform integrated into "Digital Kyiv"). Thirty-seven teams from Ukraine and the world competed. A post-hackathon survey (N=16) showed a high level of satisfaction with participation in the hackathon: 87.5% rated their experience as "good" or "excellent", 100% positively assessed mentoring support, and the greatest progress was reported in teamwork (81.3%) and critical thinking (62.5%).

Conclusions. The Fresh AIR 2026 hackathon demonstrated the effectiveness of the non-formal education format for developing interdisciplinary competencies: creativity, teamwork, critical thinking, environmental awareness, social responsibility, communication skills, and stress resistance (confirmed by survey data: 81.3% and 62.5%). Purposeful team-building contributed to psychological compatibility, role structure, and stress resistance in the context of online learning and security threats. The synergy of formal academic training and intensive competitive formats within the DOMANI project is a strategic direction for training specialists capable of effectively responding to environmental challenges of wartime and post-war times.

KEYWORDS: *hackathon, Fresh AIR 2026, DOMANI, non-formal education, team building, environmental monitoring, artificial intelligence, competencies*

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this manuscript. In addition, the authors have fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and duplicate publication.

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

AI Statement

In this study uses the Notebook LM artificial intelligence resource to generate a separate illustrative image. The authors bear full responsibility for the content, data, and conclusions.

References

1. Oyetade, K. E., Zuva, T., & Harmse, A. (2022). Educational benefits of hackathon: A systematic literature review. *World Journal on Educational Technology: Current Issues*, 14(5), 1122–1135. <https://doi.org/10.18844/wjet.v14i5.5678>
2. Costa, G., García-Holgado, A., & Alvarez, P. (2026). Systematic mapping of the literature on hackathons. *Frontiers in Education*, 10, Article 1701443. <https://doi.org/10.3389/educ.2026.1701443>
3. Schulten, C., & Chounta, I.-A. (2024). How do we learn in and from hackathons? A systematic literature review. *Education and Information Technologies*, 29, 20103–20134. <https://doi.org/10.1007/s10639-024-12645-6>
4. Barroso Quiroga, M. M., Noheda, A., & Larrachea, J. (2025). The accelerathon as a catalyst for open innovation in urban sustainability. *E3S Web of Conferences*, 654, Article 03008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202565403008>
5. Aleksanyan A., Valentini A. Measuring the impact of challenge-based learning in a social hackathon: Case study results from the Eco-Digithon. (2025). In *The Future of Education 15th Edition Conference Proceedings*. Pixel International Conferences. Retrieved from https://conference.pixel-online.net/library_scheda.php
6. *About – DOMANI Project*. (2026). DOMANI Project. Retrieved from <https://domaniproject.eu/index.php/about/>
7. *Fresh AIR 2026*. (2026). AIR Institute. <https://www.airinstitute.in/events/fresh-2026-ua>
8. *Training on organising online hackathons under the Erasmus+ DOMANI project*. (2026). Karazin Institute of Environmental Sciences, Green Energy and Sustainable Development. Retrieved from <https://ecology.karazin.ua/news/trening-z-organizacii-onlajn-hakatoniv-za-proiektom-erasmus-domani/> (in Ukrainian)
9. *Two teams, one goal: 'Karazin EcoPunks' and 'Green KaMinds' at the international hackathon under the DOMANI project*. (2026). Karazin Institute of Environmental Sciences, Green Energy and Sustainable Development. Retrieved from <https://ecology.karazin.ua/news/dvi-komandi-odna-meta-karazin-ecopunks-ta-green-kaminds-na-mizhnarodnomu-hakatoniv-za-proiektom-domani/> (in Ukrainian)
10. *The Fresh AIR 2026 hackathon was held in Ukraine*. (2026). DOMANI Project. Retrieved from <https://domaniproject.eu/index.php/the-fresh-air-2026-hackathon-was-held-in-ukraine/>



Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or Erasmus+. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

Submission received: 15.04.2026 / Revised: 16.05.2026 / Accepted: 20.05.2026 / Published: 30.05.2026

Наукове видання навчально-наукового інституту екології Харківського національного університету «Людина та довкілля. Проблеми неоекології» є науковим журналом, який включено до Переліку фахових видань ВАК (Б), де публікуються основні результати дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора і кандидата географічних наук.

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. Усі рисунки підписувати як **Рис. 1** – Назва рисунку (розмір 10). Таблиці також оформляти 10 розміром. Слово **Таблиця 1** (жирним, праворуч), на наступному рядку назва таблиці – жирним, по центру, розмір 10. **Назви рисунків та таблиць та внутрішнє наповнення має бути двома мовами(в україномовних статтях).**

Орієнтація сторінок – книжкова. Вирівнювання – по ширині. Абзац – 1,0 см.

Для статей необхідно вказати УДК (UDC) (ліворуч, розмір 11), **ініціали та прізвище автора** (розмір 11, жирним, прописними, по центру), науковий ступінь та звання (розмір 11), на наступному рядку вказати посаду, на наступному - вказати e-mail та ORCID ID. на наступному рядку вказати повну назву установи (розмір 11, курсив) та її повна адреса

Назва статті (жирними прописними, по центру, 11 розмір)

Далі подати анотацію (не менше 1800 знаків) та ключові слова (5-6) мовою статті: розмір 10, інтервал 1,0. Для експериментальних статей подати структуроване резюме, де має бути вказані слова:

Мета. Методи. Результати. Висновки.

Статті друкуються українською та англійською мовами.

Текст експериментальної статті повинен складатися з наступних розділів: «Вступ», «Методика» («Об'єкти та методи дослідження»), «Результати», «Обговорення» (можливий об'єднаний розділ «Результати та обговорення»), «Висновки», «Список використаної літератури».

Розділ «Вступ» повинен містити постановку проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими або практичними завданнями; короткий аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких розпочато рішення даної проблеми, виділення конкретних не вирішених питань, яким присвячена стаття, формулювання мети роботи.

Розділ «Методика» повинен містити відомості про об'єкт (об'єкти) дослідження, умови експериментів, аналітичні методи, прилади та реактиви.

У розділі «Результати досліджень» надаються отримані результати та повинно відображувати закономірності, які витікають з отриманих даних. Отриману інформацію необхідно порівняти з наявними літературними даними та показати її новизну.

У розділі «Висновки» надається узагальнення та інтерпретація результатів, аналіз причинно-наслідкових зв'язків між виявленими ефектами, і повинно завершуватись відповіддю на питання, яке поставлено у вступі.

Посилання на джерела у тексті подаються у прямокутних дужках з вказуванням номера **за порядком посилання.**

Список використаної літератури обов'язково оформляється за ДСТУ 8302:2015, до 60% мають бути джерела, що опубліковані за останні 5 років, до 50% мають бути посилання на статті WOS чи SCOPUS, самоцитовання до 10-15%. Обов'язковими **DOI** або **URL** – де є (розмір 10, міжрядковий інтервал 1,0). Кількість посилань має бути не менше 15.

Через 2 інтервали також подати прізвище, науковий ступінь та наукове звання, посаду, e-mail та ORCID ID, організацію, її повну адресу, назву статті, розширену анотацію та ключові слова англійською (не менше 1800 знаків, 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 ключові слова (5-6). Якщо стаття англійською, то подати цю інформацію ще і українською.

Подати також **References**, за стандартом APA (прізвище, ініціали, назва - англійською, наприкінці у дужках (In Ukrainian) та **Retrieved from** або **DOI**).

Адреса редакції: навчально-науковий інститут екології, зеленої енергетики та сталого розвитку, 4 поверх, к. 473а, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Майдан Свободи, 6, Харків, Україна, 61022

тел. 057 / 707-56-36, 057 / 707-53-86 моб. 068-612-40-69 e-mail: ecology.journal@karazin.ua

Сайт журналу: <http://periodicals.karazin.ua/humanenviron/about>

Наукове видання

ЛЮДИНА ТА ДОВКІЛЛЯ. ПРОБЛЕМИ НЕОЕКОЛОГІЇ

Випуск 45

Українською та англійською мовами

Макетування та комп'ютерне верстання
Баскакова Л. В.

Підписано до друку 30.05.26
Формат 60x84/8
Ум. друк. арк. 19,08, Обл.-вид. арк. 23,85.
Наклад 50 пр. Зам. № 7/26

61022, м. Харків, майдан Свободи, 6.
Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна
Видавництво

Надруковано ХНУ імені В. Н. Каразіна
61022, Харків, майдан Свободи, 4. Тел. 705-24-32
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3367 від 13.01.09