

ISSN: 2306-9716 (Print)  
ISSN: 2664-6110 (Online)

МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІКИ, ДОВКІЛЛЯ ТА СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНА НАУКОВА УСТАНОВА «ІНСТИТУТ ЕКОЛОГІЧНОГО ВІДНОВЛЕННЯ ТА РОЗВИТКУ УКРАЇНИ»

---

# ЕКОЛОГІЧНІ НАУКИ

---

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

**1(64)**

---



Видавничий дім  
«Гельветика»  
2026

**Екологічні науки** : науково-практичний журнал / Головний редактор Бондар О. І. – К. :  
Видавничий дім «Гельветика», 2026. – № 1(64). – 238 с.

**Головний редактор:** Бондар О. І., доктор біологічних наук

**Заступник головного редактора – відповідальний редактор:** Сікачина В. Г.

**Науковий редактор:** Машков О. А., доктор технічних наук

**Редакційна колегія:**

Новосвят А., доктор інженерних наук

Бабичев С. А., доктор технічних наук

Єрмаков В. М., доктор технічних наук

Запорожець О. І., доктор технічних наук

Маркіна Л. М., доктор технічних наук

Машков О. А., доктор технічних наук

Морозова Т. В., доктор біологічних наук

Машков В. А., доктор технічних наук

Улицький О. А., доктор геологічних наук

Риженко Н. О., доктор біологічних наук

Фролов В. Ф., доктор технічних наук

Реєстрація суб'єкта у сфері друкованих медіа: Рішення Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення № 1408 від 25.04.2024 року. Ідентифікатор медіа R30-04036.

Суб'єкт у сфері друкованих медіа – Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України» (вул. Митрополита Василя Липківського, буд. 35, м. Київ, 03035, dnu\_iev@ukr.net, тел. (044) 206-31-32).

На підставі Наказу Міністерства освіти і науки України № 409 від 17.03.2020 р. (додаток 1) журнал внесений до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б») у галузі біологічних наук (Е1 – Біологія та біохімія), природничих наук (Е2 – Екологія, Е4 – Науки про Землю) та технічних наук (G2 – Технології захисту навколишнього середовища).

Журнал публікує (після рецензування та редагування) статті, які містять нові теоретичні та практичні здобутки в галузі екологічних наук.

Мови розповсюдження: українська, англійська, польська, німецька, французька, іспанська.

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою програмного забезпечення StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl.

*Журнал включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus International  
(Республіка Польща)*

---

---

## ЗМІСТ

---

---

<b>ЕКОЛОГІЯ ЗАПОВІДНИХ ТЕРИТОРІЙ ТА РЕКРЕАЦІЙНА ДІЯЛЬНІСТЬ</b> .....	7
<b>Бондар О.І., Іваненко І.Б., Жаврида Д.Є., Іваненко Є.І.</b> Ведення рекреаційної діяльності у заповідних об'єктах без спеціальної адміністрації (на прикладі ландшафтного заказника загальнодержавного значення «Козинський»).....	7
<b>АГРОЕКОЛОГІЯ</b> .....	14
<b>Пикало С.В., Юрченко Т.В., Пірич А.В., Куманська Ю.О.</b> Методичні підходи до комплексного оцінювання генотипів зернових культур в умовах <i>in vitro</i> та <i>in vivo</i> .....	14
<b>Разанов С.Ф., Алексєєв О.О., Бахмат О.М., Крілевич В.Р.</b> Накопичення Zn у надземній масі багаторічних енергетичних культур на різних типах ґрунтів.....	20
<b>ЕКОЛОГІЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ</b> .....	30
<b>Іванов Є.А., Андрейчук Ю.М., Ваньо Н.О., Войтків П.С., Книш І.Б., Нікішкін К.П.</b> Аналіз якості атмосферного повітря у районі розроблення техногенного родовища корисних копалин «Нововолинське техногенне».....	30
<b>Мільович С.С., Галла-Бобик С.В., Ченчак М.М.</b> Динаміка зміни стану атмосферного повітря тилового міста (на прикладі м. Львова).....	40
<b>ЕКОЛОГІЯ ВОДНИХ РЕСУРСІВ</b> .....	46
<b>Божко Т.В., Пономаренко Д.В.</b> Екологічні наслідки війни для водних екосистем Сіверського Дінця (огляд).....	46
<b>Крайнюков О.М., Кривицька І.А.</b> Дослідження токсикосичних властивостей води річки Уди у межах м. Харкова.....	54
<b>Кратко О.В., Головатюк Л.М., Барабаш Ю.В.</b> Іхтіофауна річки Іква (у межах міста Кременця) як індикатор екологічного стану водної екосистеми та потенційних ризиків для здоров'я людини.....	61
<b>Мандебура В.С., Латуша Д.Р., Кватернюк С.М., Петрук В.Г., Шевченко В.О.</b> Природоорієнтовані технології очищення стічних вод від нітрогенвмісних сполук з використанням штучних водно-болотних угідь у басейні р. Південний Буг.....	66
<b>Наконечний І.В., Магась Н.І.</b> Сучасний гідроекологічний стан Софіївського водосховища річки Інгул.....	73
<b>Titiparkyn A.S.</b> Eutrophication of the Odesa coastal waters before and after the onset of the full-scale war: assessment using individual and complex indicators for 2019–2025.....	85
<b>ЕКОЛОГІЯ ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯ</b> .....	91
<b>Голембіовська О.І., Гребенюк Т.В., Федченко Є.П.</b> Екотоксикологічна оцінка ґрунтів після розмінування з використанням тесту гострої токсичності на ембріонах <i>Danio rerio</i> .....	91
<b>Парахненко В.Г., Гончарук В.В.</b> Екологічна характеристика стану ґрунтів міста Умань під впливом техногенного забруднення навколишнього середовища.....	97
<b>ЕКОЛОГІЯ ПРИРОДНИХ РЕСУРСІВ</b> .....	104
<b>Вискушенко Д.А., Никитюк Ю.А.</b> Методологічні засади дослідження екосистемних послуг лісів у контексті оцінки природного капіталу.....	104
<b>ЕКОЛОГІЯ БІОРИЗНОМАНІТТЯ</b> .....	111
<b>Купчак Р.В., Кавчук І.М., Різничук Н.І., Гнезділова В.І.</b> Екологічні ризики інвазійних видів та шляхи мінімізації їхнього впливу на місцеві екосистеми.....	111
<b>Morozova T., Kovhan Ya., Herasymenko M.</b> Spatio-temporal structure of the bird assemblage during the winter–spring transition: the role of transit zones and diurnal activity rhythms.....	115
<b>Павлишак Я.Я., Коссак Г.М., Кречківська Г.В., Даньків В.Я.</b> Отруйні рослини у складі природної флори Стрийщини (Львівська область).....	119

<b>ЕКОЛОГІЯ БУДІВНИЦТВА</b> .....	124
<b>Коваленко Ю.Л., Полив'яничук А.П.</b> Підвищення ефективності енергомодернізації будівель врахуванням фактору кліматичних умов експлуатації.....	124
<b>ЕКОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА</b> .....	133
<b>Волошин В.С.</b> Переваги матричного методу дослідження властивостей металургійних відходів у багатокомпонентних сумішах для виробництва металургійних брикетів.....	133
<b>Літвак О.А., Гура О.О.</b> Концептуальна модель розвитку екологічно орієнтованого підприємництва в умовах цифрової трансформації.....	140
<b>Павленко А.О.</b> Флористичний склад трав'яної рослинності залізрудних відвалів Криворіжжя: структурні аспекти.....	148
<b>Степовий Є.Б.</b> Дослідження кількісної характеристики біокорозійних процесів на поверхні нафтопроводів.....	155
<b>ЕКОЛОГІЯ ЕКОСИСТЕМ</b> .....	161
<b>Мельник-Шамрай В.В., Іванюк Р.О.</b> Вплив екологічних чинників на лісові екосистеми та забезпечення екосистемних послуг.....	161
<b>ТЕОРЕТИЧНА ЕКОЛОГІЯ</b> .....	168
<b>Герасимчук Л.О., Шмідт А.Є.</b> Наукові підходи до дослідження якості життя в екологічному контексті: бібліометричний аналіз.....	168
<b>РусакOVA Т.І., Войтенко Ю.В., Золотько О.В., Пасічник В.С., Максименко К.О.</b> Статистичний аналіз визначальних чинників ресурсозберігаючої поведінки молоді в контексті культури екологічної безпеки.....	174
<b>ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ</b> .....	183
<b>Ладика М.М., У Жофань.</b> Моніторинг процесів евтрофікації у затопленій долині р. Ірпінь методами ДЗЗ.....	183
<b>Рушак В.О., Чепурний І.В.</b> Оцінка схильності території у межах українських Карпат до розвитку зсувних процесів за даними дистанційного зондування та платформи Google Earth Engine.....	197
<b>Саввова О.В., Телюра Н.О.</b> Стратегічні напрями розвитку екологічно безпечних хімічних технологій в контексті геоекологічного моніторингу та євроінтеграції України.....	204
<b>ЕКОЛОГІЯ ТА ПОВОЄННИЙ РОЗВИТОК УКРАЇНИ</b> .....	211
<b>Сидоренко В.Л., Демків А.М., Доценко О.Г., Михайлова А.В., Присяжнюк В.В., Семічаєвський С.В.</b> Екологічні наслідки війни в Україні: виклики сталого відновлення.....	211
<b>ЕКОЛОГІЯ УРБАНІЗОВАНИХ ЛАНДШАФТІВ</b> .....	216
<b>Шокало Н.С., Нагорна С.В., Гапон С.В., Галицька М.А., Диченко О.Ю.</b> Ландшафтний дизайн і селекція рослин: синергія для створення сучасних зелених просторів у садово-парковому господарстві.....	216
<b>ЗБЕРЕЖЕННЯ БІОЛОГІЧНОГО ТА ЛАНДШАФТНОГО РІЗНОМАНІТТЯ</b> .....	221
<b>Ящук Л.Б., Бурлака В.С., Пашенко Г.В.</b> Відновлення деградованих ландшафтів із застосуванням біотехнологій.....	221
<b>ЗАГАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ</b> .....	226
<b>Яковлев В.В., Дмитренко Т.В.</b> Системні виклики сталому водопостачанню міст України та стратегія безпеки населення.....	226
<b>ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ</b> .....	232

---

---

## CONTENTS

---

---

<b>ECOLOGY OF PROTECTED AREAS AND RECREATIONAL ACTIVITIES</b> .....	7
<b>Bondar O., Ivanenko I., Zhavryda D., Ivanenko E.</b> Recreational Activities Management within Protected Areas without Special Administration (Landscape Reserve (“Zakaznyk”) of National Importance «Kozinsky» case study).....	7
<b>AGROECOLOGY</b> .....	14
<b>Pykalo S., Yurchenko T., Pirykh A., Kumanska Yu.</b> Methodological approaches to the comprehensive evaluation of cereal crop genotypes under <i>in vitro</i> and <i>in vivo</i> conditions.....	14
<b>Razanov S., Aliksieiev O., Bakhmat O., Krilevych V.</b> Zn accumulation in aboveground biomass of perennial energy crops on different soil types.....	20
<b>ATMOSPHERIC ECOLOGY</b> .....	30
<b>Ivanov Ye., Andreychuk Yu., Vanyo N., Voitkiv P., Knysh I., Nikishkin K.</b> Analysis of atmospheric air quality in extraction of the technogenic (man-made) mineral deposit «Novovolynske technogenic».....	30
<b>Milyovich S., Halla-Bobik S., Chenchak M.</b> The dynamics of changes in the air quality of the rear city (on the example of Lviv).....	40
<b>ECOLOGY OF WATER RESOURCES</b> .....	46
<b>Bozhko T., Ponomarenko D.</b> The influence of military actions on the state of water resources and ecosystems of the Northern donto.....	46
<b>Krainiukov O., Kryvytska I.</b> Study of the toxic properties of the Udy river water within the city of Kharkiv.....	54
<b>Kratko O., Holovatiuk L., Barabash Yu.</b> The ichthyofauna of the Ikva river (within the city of Kremenets) as an indicator of the ecological state of the aquatic ecosystem and potential risks to human health.....	61
<b>Mandebura V., Latusha D., Kvaterniuk S., Petruk V., Shevchenko V.</b> Nature-based technologies for wastewater treatment from nitrogen-containing compounds using artificial wetlands in the Southern Bug River basin.....	66
<b>Nakonechniy I., Magas N.</b> Current hydroecological status of the Sofiivske Reservoir on the Inhul River.....	73
<b>Titiapkyn A.S.</b> Eutrophication of the Odesa coastal waters before and after the onset of the full-scale war: assessment using individual and complex indicators for 2019–2025.....	85
<b>ECOLOGY OF LAND USE</b> .....	91
<b>Holembiovska O., Hrebenuik T., Fedchenko Ye.</b> Ecotoxicological assessment of soils after mining using the acute toxicity test on <i>Danio rerio</i> embryos.....	91
<b>Parakhnenko V., Goncharuk V.</b> Ecological characteristics of the state of soils in the city of Uman under the influence of technogenic pollution of the environment.....	97
<b>ECOLOGY OF NATURAL RESOURCES</b> .....	104
<b>Vyskushenko D., Nykytiuk Yu.</b> Methodological foundations of studying forest ecosystem services in the context of natural capital assessment.....	104
<b>ECOLOGY OF BIODIVERSITY</b> .....	111
<b>Kupchak R., Kavchuk I., Riznychuk N., Gniezdilova V.</b> Ecological risks of invasive species and ways to mitigate their impact on local ecosystems.....	111
<b>Morozova T., Kovhan Ya., Herasymenko M.</b> Spatio-temporal structure of the bird assemblage during the winter–spring transition: the role of transit zones and diurnal activity rhythms.....	115
<b>Pavlyshak Y., Kossak G., Krechkivska H., Dankiv V.</b> Poisonous plants in the natural flora of the Stryi region (Lviv oblast).....	119

<b>ECOLOGY OF CONSTRUCTION</b> .....	124
<b>Kovalenko Yu., Polyvianchuk A.</b> Increasing the efficiency of buildings energy modernization by taking into account the factor of climatic operating conditions.....	124
<b>ECOLOGY OF PRODUCTION</b> .....	133
<b>Voloshyn V.</b> Advantages of the matrix method of studying the properties of metallurgical waste in multicomponent mixtures for the production of metallurgical briquettes.....	133
<b>Litvak O., Hura O.</b> Conceptual model for the development of environmentally oriented entrepreneurship under conditions of digital transformation.....	140
<b>Pavlenko A.</b> Floristic composition of herbal vegetation of iron ore dumps in Kryvorizhzhia: structural aspects.....	148
<b>Stepovyi Ye.</b> Investigation of the quantitative characteristics of biocorrosion processes on the surface of oil pipelines.....	155
<b>ECOSYSTEM ECOLOGY</b> .....	161
<b>Melnyk-Shamrai V., Ivaniuk R.</b> Influence of environmental factors on forest ecosystems and ecosystem services.....	161
<b>THEORETICAL ECOLOGY</b> .....	168
<b>Herasymchuk L., Shmidt A.</b> Scientific Approaches to the Study of Quality of Life in the Environmental Context: A Bibliometric Analysis.....	168
<b>Rusakova T., Voitenko Y., Zolotko O., Pasichnyk V., Maksymenko K.</b> Statistical analysis of determining factors of youth resource-saving behavior in the context of environmental safety culture.....	174
<b>ENVIRONMENTAL MONITORING</b> .....	183
<b>Ladyka M., Wu Ruofan.</b> Monitoring Of Eutrophication Processes in the Flooded Irpin River Valley by Remote Sensing Methods.....	183
<b>Rushchak V., Chepurnyi I.</b> Assessment of Landslide Susceptibility of the territory within of the Ukrainian Carpathians Using Remote Sensing Data and the Google Earth Engine Platform.....	197
<b>Savvova O., Teliura N.</b> Strategic directions for the development of environmentally safe chemical technologies in the context of geo-ecological monitoring and European integration of Ukraine.....	204
<b>ECOLOGY AND POST-WAR DEVELOPMENT OF UKRAINE</b> .....	211
<b>Sydorenko V., Demkiv A., Dotsenko O., Mykhailova A., Prysiazhniuk V., Semychaievskiy S.</b> Environmental consequences of the war in Ukraine: challenges of sustainable recovery.....	211
<b>ECOLOGY OF URBAN LANDSCAPES</b> .....	216
<b>Shokalo N., Nahorna S., Hapon S., Galytska M., Dychenko O.</b> The landscape design and plant breeding: synergy for creating modern green spaces in gardening and parking.....	216
<b>PRESERVATION OF BIOLOGICAL AND LANDSCAPE DIVERSITY</b> .....	221
<b>Yashchuk L., Burlaka V., Pashchenko H.</b> Restoration of degraded landscapes using biotechnology.....	221
<b>GENERAL ENVIRONMENTAL SAFETY ISSUES</b> .....	226
<b>Yakovlev V., Dmytrenko T.</b> Systemic challenges to sustainable water supply in Ukrainian cities and a strategy for population safety.....	226
<b>AUTHORS' CREDENTIALS</b> .....	232

---

# ЕКОЛОГІЯ ЗАПОВІДНИХ ТЕРИТОРІЙ ТА РЕКРЕАЦІЙНА ДІЯЛЬНІСТЬ

---

УДК 502.45

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.1-64.1>

## ВЕДЕННЯ РЕКРЕАЦІЙНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ У ЗАПОВІДНИХ ОБ'ЄКТАХ БЕЗ СПЕЦІАЛЬНОЇ АДМІНІСТРАЦІЇ (НА ПРИКЛАДІ ЛАНДШАФТНОГО ЗАКАЗНИКА ЗАГАЛЬНОДЕРЖАВНОГО ЗНАЧЕННЯ «КОЗИНСЬКИЙ»)

Бондар О.І.<sup>1</sup>, Іваненко І.Б.<sup>1</sup>, Жаврида Д.Є.<sup>2</sup>, Іваненко Є.І.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»  
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, 03035, Київ

<sup>2</sup> БО «Благодійний фонд еколого-рекреаційного та спортивного розвитку»  
вул. Березняківська, 29, 02098, Київ

<sup>3</sup> Інститут географії Національної академії наук України  
вул. Володимирська, 44, 01054 м. Київ

[dnu\\_iev@ukr.net](mailto:dnu_iev@ukr.net), [daria\\_zhavryda\\_mepr\\_gov\\_ua@ukr.net](mailto:daria_zhavryda_mepr_gov_ua@ukr.net), [ivanenko\\_eugene@ukr.net](mailto:ivanenko_eugene@ukr.net)

Окреслено форми та напрямки рекреаційної діяльності у заповідних об'єктах без спеціальної адміністрації (на прикладі ландшафтного заказника загальнодержавного значення «Козинський», для якого було розроблене наукове обґрунтування згідно з наказом Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 26.07.2022 № 256). Подано структуру рекреаційної мережі, що локалізована на трьох ділянках пріоритетної рекреаційної діяльності. Вона складається з рекреаційних маршрутів, Еколого-освітнього центру (інформаційно-туристичного центру) та облаштованих місць для різних напрямків рекреаційної діяльності. Подано опис еколого-освітнього рекреаційного центру та просторове розміщення його елементів. У межах рекреаційної мережі розроблені три рекреаційні маршрути (зокрема – гольф-маршрут) із врахуванням нормативних документів, а також і рекреаційної реабілітації військовослужбовців з реалізацією проєктів фізичної та соціально-психологічної реабілітації ветеранів. На основі відповідних методичних рекомендацій означено рекреаційну особливість ділянок пріоритетної рекреаційної діяльності та рекреаційну ємність рекреаційних маршрутів, що засвідчило вагомості розвитку рекреаційної мережі. Представлена методика обґрунтує конструктивний підхід, реалізований на практиці, до ведення планованої рекреаційної діяльності на заповідних територіях, для яких не передбачене обов'язкове адміністрування. Запропонований практичний підхід та методи управління можуть використовуватися як досвід для інших заповідних об'єктів, що функціонують без створення спеціальної адміністрації, з урахуванням їх природоохоронних, соціальних та інфраструктурних особливостей. Його впровадження сприятиме поєднанню цілей збереження природних екосистем із забезпеченням доступної та збалансованої рекреаційної діяльності у відповідності до чинних вимог природоохоронного законодавства. Отримані результати засвідчують доцільність системного управління в плануванні рекреаційного навантаження на території та об'єкти природно-заповідного фонду як інструменту сталого розвитку заповідних територій. *Ключові слова:* заповідна територія без спеціальної адміністрації, екологічна політика, сталий розвиток, збалансоване природокористування, рекреаційна діяльність, екоцентр, природно-заповідний фонд, природні екосистеми, природоохоронне законодавство.

**Recreational Activities Management within Protected Areas without Special Administration (Landscape Reserve (“Zakaznyk”) of National Importance «Kozynsky» case study). Bondar O., Ivanenko I., Zhavryda D., Ivanenko E.**

The article describes an approach to conducting recreational activities in protected areas without a special administration. The example is the landscape reserve of national importance «Kozynsky», for which a scientific justification was developed in accordance with the Order of the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine dated July 26, 2022 No. 256. The structure of the recreational network, localized in three areas of priority recreational activity, is presented. It consists of recreational routes, an Ecological and Educational Center (information and tourist center) and equipped places for various areas of recreational activity. A description of the ecological and educational center and the spatial arrangement of its elements are given. Within the recreational network, three recreational routes were developed, in particular a golf route, taking into account regulatory documents. The routes were developed in particular within the framework of recreational rehabilitation of military personnel with the implementation of projects for the physical and socio-psychological rehabilitation of veterans. Based on the relevant methodological recommendations, the recreational capacity of priority recreational activity areas and the recreational capacity of recreational routes were determined, which showed significant opportunities for the development of the recreational network in comparison with the existing one. The presented methodology substantiates a constructive approach, implemented in practice, to



conducting planned recreational activities in protected areas for which mandatory administration is not provided. The proposed approach may serve as a model for other protected areas operating without the establishment of a dedicated administrative body, taking into account their environmental, social, and infrastructural characteristics. Its implementation will facilitate the integration of natural ecosystem conservation objectives with the provision of accessible and balanced recreational activities in compliance with current environmental protection legislation.

The obtained results confirm the feasibility and relevance of a systemic management approach to planning recreational pressure on the territories and sites of the Nature Reserve Fund as a tool for the sustainable development of protected areas. *Key words:* protected area without special administration, environmental policy, sustainable development, balanced nature management, recreational activities, eco-center, Nature Reserve Fund, natural ecosystems, environmental protection legislation.

### Актуальність дослідження

В умовах сучасних екологічних викликів, військової агресії росії проти України, подальшої урбанізації, імплементації національної та європейської екологічної політики питання реалізації природоохоронного законодавства набуває особливого значення та є актуальним. Ефективний розвиток рекреації на об'єктах природно-заповідного фонду (ПЗФ) є невід'ємною складовою збереження таких територій та забезпечення сталого природокористування.

У межах заповідних об'єктів без спеціальної адміністрації існує певна невизначеність щодо ведення рекреаційної діяльності, тому існує необхідність зосередитися на формуванні нових підходів до управління рекреаційними ресурсами для таких територій, враховуючи потреби населення та екологічні вимоги. Це передбачає розроблення чітких науково обґрунтованих рекомендацій щодо обсягу та типів рекреаційних навантажень, які можуть здійснюватися на певній території природно-заповідного фонду, без шкоди для навколишнього середовища в рамках визначеного охоронного режиму. Крім того, що важливо, необхідно забезпечити постійний моніторинг екологічного стану рекреаційних об'єктів, впроваджувати відповідні програми екологічної освіти для відвідувачів, а також активізувати співпрацю між науковими установами, державними органами, органами місцевого самоврядування та громадськими організаціями. Лише таким чином можна досягти ефективної реалізації природоохоронного законодавства та забезпечити сталий розвиток рекреаційної діяльності в Україні, що є запорукою належного збереження природних цінностей в подальшому [1, 2].

### Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями

«Положення про рекреаційну діяльність у межах територій та об'єктів природно-заповідного фонду України» (далі – Положення), затверджене Наказом Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 26.07.2022 № 256 встановлює основні принципи і правила організації рекреаційної діяльності, що, в свою чергу, покликані забезпечити баланс між розвитком рекреації та охороною природних ресурсів. Втім, існує низка проблем, перешкоджаючих ефективній реалізації Положення для заповідних територій, що не мають спеціальної адміністрації.

По-перше, відсутність наукового обґрунтування рекреаційних заходів може призводити до надмірного навантаження на природні екосистеми. По-друге, відсутність чітких методичних рекомендацій щодо реалізації рекреаційних проектів на території ПЗФ часто спричиняє порушення чинних вимог законодавства та негативно впливає на стан довкілля.

### Методологічне або загальнонаукове значення

З метою усунення таких недоліків виникла потреба в проведенні відповідних наукових досліджень і подальшого планування, які б обґрунтували ефективну стратегію розвитку рекреації на територіях ПЗФ без спеціальної адміністрації.

У праці наведені результати досліджень на прикладі конкретної заповідної території – науково обґрунтування рекреаційної діяльності у ландшафтному заказнику загальнодержавного значення «Козинський» (далі – Заказник).

### Виклад основного матеріалу

#### Структура рекреаційної мережі в межах Заказника.

Рекреаційна мережа в межах Заказника локалізована на трьох окремих ділянках (рис. 1), яким надана відповідна спрямованість – це території пріоритетної рекреаційної діяльності (окреслення цих та інших ділянок детально обґрунтовано у Програмі розвитку та рекреаційної діяльності ландшафтного заказника загальнодержавного значення «Козинський» [3, 4]).

Рекреаційна мережа Заказника складається з рекреаційних маршрутів, Еколого-освітнього центру (відповідає інформаційно-туристичному центру згідно з термінологією Положення) та облаштованих місць для різних напрямків рекреаційної діяльності (рис. 2).

Перелік рекреаційних маршрутів складається з трьох маршрутів, зокрема сюди входять гольф-маршрути у якості рекреаційного маршруту № 1 (рис. 3).

#### Еколого-освітній центр

Еколого-освітній центр (інформаційно-туристичний центр) реабілітації «Козин» (Екоцентр) є комплексом рекреаційної інфраструктури (рис. 3, 4). Елементи рекреаційної інфраструктури (зокрема, під'їзди до візит- центрів та заборонні знаки, різні елементи водопровідно-каналізаційної комунікації, санітарно-гігієнічні приміщення та комунікації для їх облаштування, засоби для рекреації та відпочинку (мангали, каміни, генератори), господарські примі-

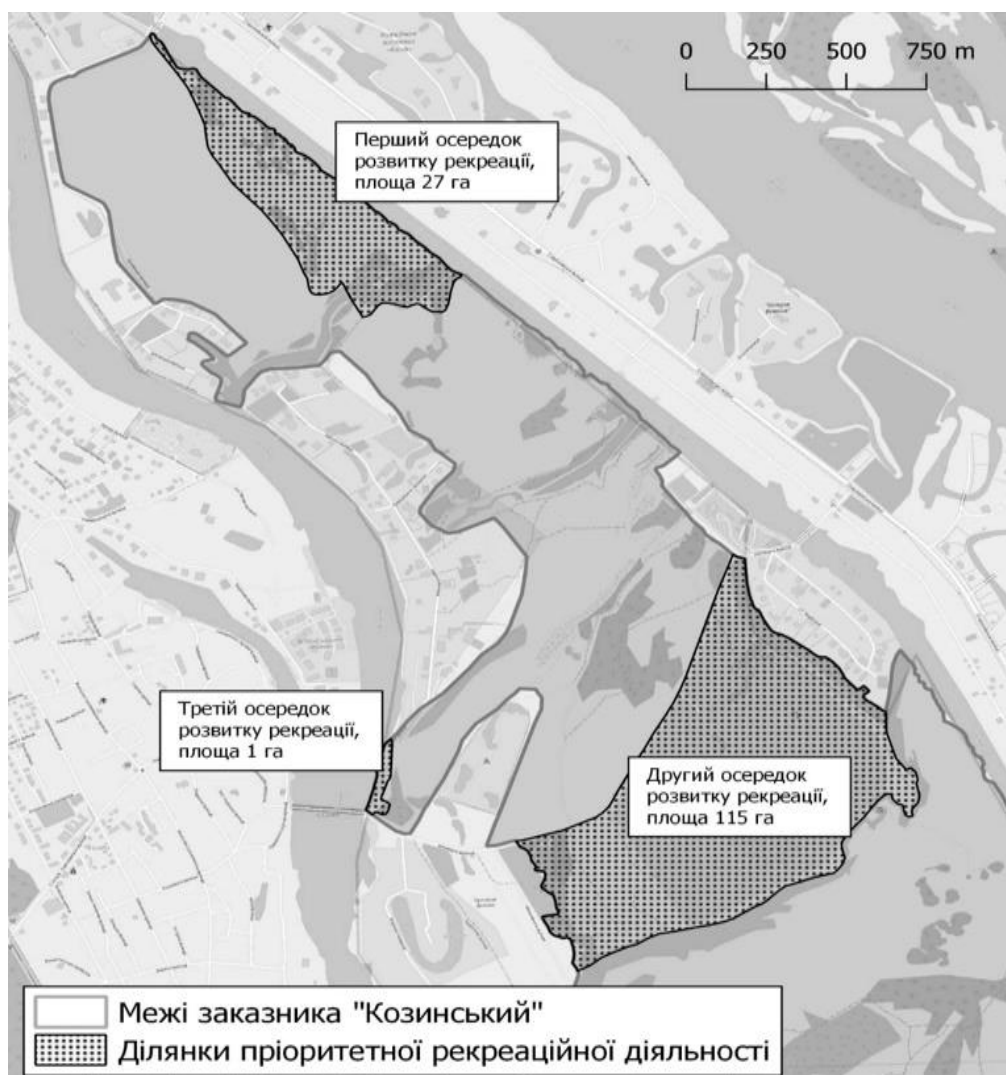


Рис. 1. Розміщення трьох ділянок пріоритетної рекреаційної діяльності

щення та ін.) можуть бути віднесені до таких типів призначення: торговельного, побутового, соціально-культурного чи іншого призначення, з можливістю суб'єктів рекреаційної діяльності до надання рекреаційних послуг та означення земельного сервітуту щодо облаштування об'єктами рекреаційної інфраструктури та елементами їхнього обслуговування.

Екоцентр є важливим інституційним органом, який здійснює важливу громадсько-корисну діяльність та є яскравим фактором синергії, оскільки діяльність центру спрямована не тільки на природоохоронне просвітництво, збереження біорізноманіття, відновлення природних ресурсів, поліпшення довкілля, але й на реабілітацію фізичних та духовних цінностей людини (рис. 5).

#### **Рекреаційні маршрути**

В умовах повномасштабної агресії росії проти України виникла гостра потреба у використанні природних рекреаційних ресурсів Заказника для реабілі-

тації військовослужбовців та ветеранів з метою відновлення їх розумових, духовних та фізичних сил. Відповідно до Положення особливу увагу приділено створенню рекреаційної інфраструктури, комфортних умов для відпочинку, оздоровлення та туризму в природних умовах з додержанням режиму охорони заповідних природних комплексів Заказника. В рамках рекреаційної реабілітації військовослужбовців реалізуються проєкти фізичної і соціально-психологічної реабілітації ветеранів. Така допомога надається шляхом організації системних профілактичних занять, зокрема, на майданчиках для гольфу та інших рекреаційних маршрутах із забезпеченням усієї сукупності елементів облаштування та засобів організації для здійснення рекреаційної реабілітаційної діяльності. Військові під наглядом реабілітолога випробовують методику комбінованої реабілітації через гру в гольф, використання якого для реабілітації вдало практикується як в Україні, так і за її межами.

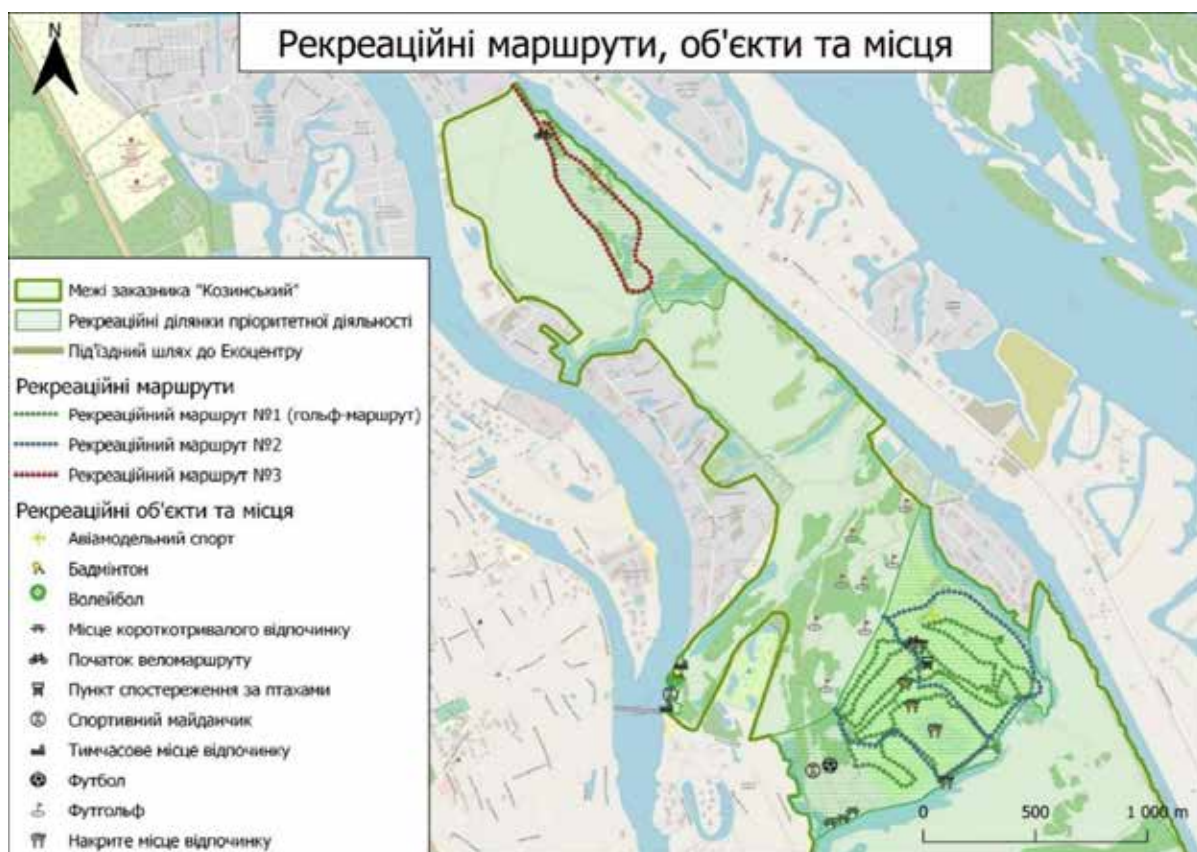


Рис. 2. Рекреаційні маршрути, об'єкти та місця в Заказнику



Рис. 3. Схема структурних елементів Еколого-освітнього інформаційно-туристичного центру (Еколого-рекреаційний центр реабілітації «Козин»)

У цілому, в межах заказника прокладено 3 рекреаційні маршрути, схема розміщення яких представлена на рис. 2. Розроблені паспорти таких маршрутів.

Рекреаційний маршрут № 1 (гольф-маршрут) починається і закінчується неподалік дороги смт Козин – СТ «Берегиня». Пролягає в межах між цією дорогою та рукавом р. Козинка на південному-сході. Маршрут призначений для гри в гольф та прогулянок. Він облаштований двадцятьма місточками через заболочені ділянки та тринадцятьма пунктами відпочинку, одинадцять з яких – це навіси з лавочками. Протяжність маршруту – 7300 м.

Рекреаційний маршрут № 2 починається біля дороги смт Козин – СТ «Берегиня» і закінчується на цій же дорозі, на південний захід. Пролягає в межах між цією дорогою та рукавом р. Козинка на південному-сході – загалом там же, де і рекреаційний маршрут № 1. І для них обох доступні всі облаштовані місця. Відмінність другого маршруту від першого в тому, що він набагато менш звивистий. Призначений скоріше для більш швидкої прогулянки або пробіжки. Протяжність маршруту складає 3000 м.

Рекреаційний маршрут № 3 – замкнутий. Він починається і закінчується коло північної переправи на територію Заказника. Лежить в межах ділянки рекреаційного призначення. Пролягає межею масиву деревної рослинності та луків по облаштованій стежці. Має зручний доступ до води. Призначений як для піших, так і для велосипедних прогулянок. Протяжність маршруту – 2100 м.



Рис. 4. Просторове розміщення елементів Екоцентру



Рис. 5. Гольф-маршрути (рекреаційний маршрут № 1)

## Рекреаційна ємність ділянок пріоритетної рекреаційної діяльності

Ділянки пріоритетної рекреаційної діяльності	Площа, га	Потенційне навантаження на одиницю площі, осіб на день/га	Потенційне навантаження на ділянку, осіб на день/га
Перший	27	1,9	51,3
Другий	115	5,9	678,5
Третій	1	60	60

**Розрахунок рекреаційного навантаження.**

Розрахунки максимального рекреаційного навантаження на природні комплекси Заказника здійснені у відповідності до «Методичних рекомендацій щодо визначення максимального рекреаційного навантаження природних комплексів і об'єктів у межах природно-заповідного фонду України за зонально-регіональним розподілом» [5].

Територія ландшафтного заказника розташована в межах Процівсько-Ліпнявського фізико-географічного району Північно-Придніпровської терасової низовинної області Лівобережно-Дніпровського краю лісостепової зони України. Це враховано при визначенні стадій рекреаційної дигресії та показників стійкості природних комплексів до рекреаційного навантаження. За методичними рекомендаціями визначена третя і четверта ступені стійкості ландшафтних комплексів, представлених луками в межах рекреаційних зон, зважаючи на переважаючі екологічні групи (мезофіти та ксеромезофіти) та на вибагливість рослин до умов зволоження (вологі та сухі і свіжі). Стадія дигресії визначена за станом трав'яного рослинного покриву та його потенційною стійкістю. Для нелісових територій Заказника визначена друга стадія дигресії, виходячи з показника коефіцієнту рекреації та стану лучного покриву.

Згідно з Методичними рекомендаціями для кожної з трьох ділянок пріоритетної рекреаційної діяльності (рис. 1), максимальне рекреаційне навантаження на природні комплекси та об'єкти у межах природно-заповідного фонду України за зонально-регіональним розподілом природних ландшафтів відображено у таблиці 1.

Рекреаційна ємність маршрутів визначена за формулою та вказано у таблиці 2:

$$Pdn = T \times G \times V - L \times G$$

де, Pdn – кількість осіб, T – час відкритого маршруту, L – довжина траси, G – щільність, людина/км, V – швидкість руху, км/год.

Рекреаційний маршрут № 1 (гольф-маршрут):

$$Pdn = 4 \text{ год} \times 25,5 \text{ люд/км} \times 2 \text{ км/год} - 7,3 \text{ км} \times 25,5 \text{ люд/км} = 18 \text{ осіб}$$

Рекреаційний маршрут № 2:

$$Pdn = 2 \text{ год} \times 10 \text{ люд/км} \times 4 \text{ км/год} - 3 \text{ км} \times 10 \text{ люд/км} = 50 \text{ осіб}$$

Рекреаційний маршрут № 3:

$$Pdn = 2 \text{ год} \times 14 \text{ люд/км} \times 4 \text{ км/год} - 2,1 \text{ км} \times 14 \text{ люд/км} = 82 \text{ особи}$$

**Рекреаційна ємність маршрутів**

Назва маршруту	Кількість осіб
Рекреаційний маршрут (гольф-маршрут) № 1	18
Рекреаційний маршрут № 2	50
Рекреаційний маршрут № 3	82

Для гольф-поля площею 67 га, межі якого входять до другої ділянки пріоритетної рекреаційної діяльності, максимально допустиме рекреаційне навантаження становить 448 осіб на день. Фактичне наявне рекреаційне навантаження – 36 (18×2) осіб на день – нижче у 12 разів за максимально допустиме, що свідчить про нереалізований рекреаційний потенціал цього осередку та можливість залучення більшої кількості відпочиваючих та рекреантів. З іншого боку саме суттєво знижене рекреаційне навантаження в межах гольф-поля дозволяє утримувати його в зразковому, в основному, природному стані, що характеризується збереженням максимального різноманіття наявних ландшафтів та біотопів. Зазначені показники рекреаційного навантаження раніше використовувались у якості лімітів для кількості людей, які можуть відвідати конкретний об'єкт протягом дня. Згідно з роз'ясненням Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України, встановлення лімітів для кількості рекреантів чи відвідувачів еколого-освітніх маршрутів було припинено, оскільки ліміти встановлюються для природних ресурсів, які використовуються в процесі господарської діяльності. Люди не є природним ресурсом, який використовується в процесі рекреаційної та еколого-освітньої діяльності, тому на них ліміти не встановлюються, а також на кількість автотранспорту, що може доставляти рекреантів для відпочинку та оздоровлення з паркуванням у спеціально відведених місцях. Разом з тим слід дотримуватись таких обмежень в розміщенні кількості одиниць автотранспорту в періоди: вихідні дні – до 32 автомобілів на день, будні дні – до 12 автомобілів на день [6].

**Висновки.**

Під час дослідження рекреаційної діяльності (на прикладі Заказника) було з'ясовано, що правильна та ефективна реалізація природоохоронного законодавства є досить важливою для забезпечення сталого

розвитку рекреації на територіях та об'єктах природно-заповідного фонду. Розроблене наукове обґрунтування рекреаційної діяльності у Заказнику засвідчує можливість і необхідність планування та ведення такої діяльності в межах заповідних територій без

спеціальної адміністрації з дотриманням сталого природокористування. Подібні наукові дослідження можуть стати основою для коригування стратегій управління і забезпечення належного рівня охорони природних ресурсів [7, 8].

#### Література

1. Про затвердження Положення про рекреацію в об'єктах природно-заповідного фонду України: наказ Міністерства екології та природних ресурсів України від 26.07.2022 р. № 256. Офіційний вісник України. 2022. № 74, том 2. С. 867. Доступно: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1043-22#Text>
2. Іваненко І. Б., Іваненко Є. І. (2023). Менеджмент територій природно-заповідного фонду без спеціальних адміністрацій (на прикладі ландшафтного заказника загальнодержавного значення «Козинський»). Український географічний журнал, № 4, С. 17-25. DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2023.04.017>
3. Положення про ландшафтний заказник загальнодержавного значення «Козинський»: наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 03.01.2025 р. № 10.
4. Програма розвитку та рекреаційної діяльності ландшафтного заказника загальнодержавного значення «Козинський». 2018. С. 186.
5. Методичні рекомендації щодо визначення максимального рекреаційного навантаження природних комплексів і об'єктів у межах природно-заповідного фонду України за зонально-регіональним розподілом / Державна служба заповідної справи Мінекоресурсів України, Науковий центр заповідної справи Мінекоресурсів України. – К., 2003. – 43 с.
6. Наукове обґрунтування щодо регульованої рекреаційної діяльності на території ландшафтного заказника загальнодержавного значення «Козинський» з додержанням встановленого режиму території. ДЗ «Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління. 2023.
7. European Commission. (2021). European Green Deal: Striving to be the first climate-neutral continent. URL: <https://ec.europa.eu>
8. United Nations Environment Programme. (2020). Ecosystem management: Policy approaches and practices for sustainable development. URL: <https://www.unep.org>

Дата першого надходження статті до видання: 30.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026

## МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО КОМПЛЕКСНОГО ОЦІНЮВАННЯ ГЕНОТИПІВ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР В УМОВАХ *IN VITRO* ТА *IN VIVO*

Пикало С.В.<sup>1</sup>, Юрченко Т.В.<sup>1</sup>, Пірич А.В.<sup>1</sup>, Куманська Ю.О.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Миронівський інститут пшениці імені В.М. Ремесла  
Національної академії аграрних наук України  
08853, с. Центральне, Київська обл.

<sup>2</sup>Білоцерківський національний аграрний університет  
пл. Соборна, 8/1, 09117, м. Біла Церква  
[pykserg@ukr.net](mailto:pykserg@ukr.net)

В умовах посилення кліматичних змін, зростання частоти посух і температурних коливань особливої ваги набуває формування сортів зернових культур, здатних стабільно реалізовувати свій генетичний потенціал за різних рівнів зволоження та температурного режиму. Особливого значення набуває пошук і створення сортів, здатних поєднувати високу продуктивність із стійкістю до абіотичних стресів. У представленій роботі розроблено методичні підходи до оцінки та добору селекційного матеріалу зернових колосових культур (пшениця, ячмінь, тритикале) за морозо-, посухостійкістю. Наведено застосування комбінованого підходу, який передбачає поетапне проведення лабораторних і біотехнологічних методів для комплексної об'єктивної оцінки та добору стійких до абіотичних стресів генотипів зернових культур. Висвітлені методичні аспекти різних способів оцінки та добору рослин зернових культур за стійкістю до абіотичних стресів в умовах нестійкого клімату дадуть змогу об'єктивно характеризувати рівень адаптації перспективних зразків і прогнозувати їхню реакцію у відповідних екологічних умовах. Комплексне оцінювання генотипів зернових культур на різних етапах розвитку рослин дозволяє достовірно оцінити вихідний матеріал за морозо-, посухостійкістю, прискорити селекційний процес та ефективно відібрати генетичні джерела з цінними господарськими ознаками. Вдосконалені біотехнологічні способи доповнять методологію задля розширення генетико-селекційного потенціалу зернових та створення нових сортів із цінними селекційними властивостями. Представлені методичні рекомендації сприятимуть розв'язанню проблеми стійкості зернових колосових культур до несприятливих кліматичних чинників та впровадженню нових підходів для вирішення прикладних завдань сучасної селекції. Розроблені підходи щодо оцінки адаптивного потенціалу рослин, зокрема метод *in vitro* для визначення стійкості до водного дефіциту, відкривають нові можливості для прискорення добору селекційного матеріалу з підвищеною толерантністю до абіотичних чинників. *Ключові слова:* зернові культури, абіотичні стресори, стійкість, оцінка, добір, культура *in vitro*.

**Methodological approaches to the comprehensive evaluation of cereal crop genotypes under *in vitro* and *in vivo* conditions.**  
Pykalo S., Yurchenko T., Piryich A., Kumanska Yu.

Under conditions of intensifying climate change, increasing frequency of droughts, and growing temperature fluctuations, the development of cereal crop cultivars capable of consistently realizing their genetic potential under varying moisture levels and temperature regimes becomes particularly important. Special attention is therefore given to the search for and development of cultivars that combine high productivity with resistance to abiotic stresses. The present study proposes methodological approaches for the evaluation and selection of breeding material of cereal crops (wheat, barley, and triticale) with respect to frost and drought tolerance. A combined approach is presented, which involves the stepwise application of laboratory and biotechnological methods to ensure a comprehensive and objective assessment and selection of cereal genotypes resistant to abiotic stresses. The described methodological aspects of various evaluation and selection techniques for cereal crops under unstable climatic conditions enable an objective characterization of the adaptive capacity of promising genotypes and allow prediction of their responses under specific environmental conditions. Comprehensive assessment of cereal genotypes at different stages of plant development makes it possible to reliably evaluate the initial breeding material for frost and drought tolerance, accelerate the breeding process, and efficiently identify genetic sources possessing valuable agronomic traits. Improved biotechnological approaches complement the proposed methodology by expanding the genetic and breeding potential of cereal crops and facilitating the development of new cultivars with desirable breeding characteristics. The presented methodological recommendations contribute to addressing the problem of resistance of cereal crops to adverse climatic factors and to the implementation of novel approaches for solving applied tasks in modern breeding. The developed approaches for assessing plant adaptive potential, particularly the *in vitro* method for determining tolerance to water deficit, open new opportunities for accelerating the selection of breeding material with enhanced tolerance to abiotic stresses. *Key words:* cereal crops, abiotic stressors, resistance, evaluation, selection, *in vitro* culture.



**Постановка проблеми.** Кліматичні зміни дедалі частіше виступають визначальним обмежувальним чинником реалізації генетичного потенціалу високопродуктивних сортів зернових [1]. Повторювані екстремальні кліматичні явища призводять до значних втрат урожаю та в окремих випадках зумовлюють зниження придатності цілих аграрних регіонів до сільськогосподарського використання [2]. Загальне погіршення стану довкілля, зростання антропогенного навантаження та посилення процесів аридизації клімату актуалізували проблему адаптації, яка набула провідного значення в сучасній біології та фізіології рослин [3; 4]. Умови глобального потепління та зростання частоти посух обумовлюють необхідність консолідації зусиль біотехнологів, генетиків і селекціонерів, спрямованих на створення адаптивних генотипів зернових.

**Актуальність дослідження.** Генетична різноманітність сортів сільськогосподарських культур, що відрізняються за напрямками використання, показниками якості продукції, рівнем адаптивності та іншими господарсько цінними ознаками, є одним із ключових чинників забезпечення продовольчої безпеки та сталого розвитку аграрного виробництва [5]. Розвиток сучасної генетики й біотехнології сприяв появі нових і вдосконаленню традиційних селекційних підходів, орієнтованих на створення сортів із комплексом цінних господарських ознак [6]. У межах класичної технології селекційного процесу пшениці на сучасному етапі особливої ваги набувають зосередження, пошук і формування генетично різноманітного вихідного матеріалу. З урахуванням економічних та екологічних обмежень, пов'язаних зі скороченням посівних площ і зростанням витрат на інтенсифікацію землеробства, створення високопродуктивних сортів розглядається як найбільш ефективний і економічно доцільний шлях підвищення врожайності [7]. Генетичне вдосконалення зернових культур має визначальне значення з огляду на їхній прямиий вплив на економічний розвиток, міжнародну торгівлю зерном і рівень продовольчої безпеки держави, у зв'язку з чим актуальність досліджень, спрямованих на розв'язання генетико-селекційних завдань щодо цих культур, постійно зростає та набуває нового якісного рівня [8]. Нині генетико-селекційні дослідження злакових культур зосереджені на поглибленні уявлень про механізми стійкості рослин до стресових чинників довкілля та на селекції високопродуктивних сортів, адаптованих до конкретних умов вирощування.

**Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.** Представлені матеріали є частиною науково-дослідної роботи: «Особливості формування ознак і властивостей зернових культур, які визначають стійкість до абіотичних стресових чинників, в умовах Лісостепу України з використанням біотехнологічних та фізіолого-генетичних методів» (номер державної реєстрації № 0121U100435).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Створення високопродуктивних сортів зернових з підвищеною стійкістю до абіотичних чинників довкілля, які визначають умови росту й розвитку рослин та їхній фізіологічний стан, є одним із пріоритетних завдань сучасної селекції [9]. Такі сорти забезпечують стабільне формування врожаю незалежно від мінливості погодних умов і зниження рівня агрокліматичної передбачуваності [10]. З огляду на те, що кліматичні зміни супроводжуються зростанням амплітуди коливань температурного режиму та нерівномірністю вологозабезпечення, питання адаптивності сортів набуває визначального значення для підтримання стабільності зернового виробництва [11]. У зв'язку з цим зростає потреба в науковому супроводі селекційних програм, спрямованих на створення генотипів, здатних максимально реалізувати свій продуктивний потенціал у різних ґрунтово-кліматичних умовах.

Стійкість до абіотичних стресових чинників є ключовим напрямом селекційного вдосконалення зернових, оскільки вона не лише знижує ризики втрати врожаю, а й створює передумови для розширення посівних площ злакових культур в регіонах із несприятливими кліматичними умовами [12]. Найважливішими складниками адаптивності є стійкість до несприятливих умов перезимівлі, зокрема дії екстремально низьких температур, а також посухостійкість, яка залишається одним із найпоширеніших і найнебезпечніших стресових чинників упродовж вегетаційного періоду [13]. Вплив цих факторів зумовлює порушення водного балансу, фотосинтетичної активності та інших фізіологічних процесів, що безпосередньо відображається на рівні продуктивності рослин.

Важливу роль у розв'язанні зазначених завдань відіграють біотехнологічні методи, які в поєднанні з традиційною селекційною практикою істотно розширюють можливості генетичного поліпшення зернових та підвищення їх продуктивності [6; 14]. За останні десятиліття біотехнологічні підходи стали невід'ємною складовою сучасних аграрних досліджень і широко застосовуються в селекційних програмах у різних країнах світу [15]. Їх використання дає змогу значно скоротити тривалість селекційного циклу, оптимізувати добір і оцінку вихідного матеріалу, а також підвищити ефективність ідентифікації генотипів зі стійкістю до абіотичних стресів [16]. Крім того, біотехнології сприяють розширенню генетичної мінливості та доповнюють класичні методи селекції, що є необхідною передумовою створення нових сортів із заданими адаптивними та господарсько цінними ознаками [17].

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** Багатогранність проблеми стійкості рослин до стресових чинників потребує застосування для свого вирішення комплексних підходів. Включення

фізіологічних і біохімічних ознак у потенційно високопродуктивний генотип може поліпшити його адаптивність та дає можливість глибше вивчити його реакцію на мінливість середовища. Комплексне оцінювання зразків на різних етапах розвитку рослин дасть змогу більш об'єктивно та достовірно оцінити генотипи за стійкістю до стресу різної природи. Поряд з морфолого-анатомічними і фізіолого-біохімічними методами оцінки стрес-стійкості рослин широкого поширення набули біотехнологічні підходи. Вивчення адаптивної здатності зернових культур у поєднанні з їхньою продуктивністю на основі комплексного підходу сприятиме вдосконаленню та розробці ефективних методів створення нового перспективного селекційного матеріалу і його поглибленому науковому аналізу.

**Мета** роботи – розробити систему комплексного оцінювання стійкості до абіотичних стресів генотипів зернових культур в умовах *in vitro* та *in vivo*.

**Новизна.** Наукова новизна роботи полягає у поєднанні польових та лабораторних методів (*in vivo* та *in vitro*) для оцінки адаптивного потенціалу сортів зернових, що забезпечило об'єктивне порівняння їх реакції на посуху, низькі температури. Проведення скринінгу на штучних осмотичних середовищах з манітом та сахарозою дає змогу виокремити генотипи з підвищеною толерантністю до водного дефіциту на різних рівнях організації рослин.

**Методологічне або загальнонаукове значення.** Створено науково обґрунтовану базу для формування нових генотипів зернових з комплексною стійкістю до абіотичних стресових чинників. Розроблено методичні рекомендації щодо оцінювання та добору сортів за адаптивними ознаками [18], які можуть бути використані не лише селекціонерами, а й агро-виробниками, що розширює масштаби їх практичного застосування.

**Виклад основного матеріалу.** У відділі біотехнології, генетики і фізіології розроблено поетапну схему комплексної оцінки, добору та стабілізації селекційного матеріалу зернових колосових культур за адаптивними ознаками з використанням умов *in vivo* та *in vitro*. Вона включає п'ять послідовних етапів, кожен з яких спрямований на поетапне вивчення вихідного матеріалу та ідентифікацію генотипів із підвищеною стійкістю до абіотичних стресових чинників (рис. 1).

На першому етапі здійснювали первинну оцінку селекційного матеріалу за основними адаптивними ознаками – морозо- та посухостійкістю. Оцінювання морозостійкості проводили шляхом контрольованого заморожування рослин у висівних ящиках, а також проростків у марлевих мішечках, що дозволяло моделювати вплив низьких температур на різних етапах онтогенезу [19]. Посухостійкість визначали за двома підходами: шляхом пророщування насіння на розчинах осмотика, який дає змогу імітувати умови зневоднення на ранніх фазах розвитку, а також мето-

дом оцінки виходу електролітів із листків рослин, що відображає ступінь пошкодження клітинних мембран за водного дефіциту [20]. За результатами первинної оцінки проводили відбір зразків із підвищеною стійкістю за досліджуваними ознаками для подальших етапів селекційного процесу.

Другий етап спрямований на вторинну оцінку та поглиблений добір селекційного матеріалу за показниками морозо- та зимостійкості. На цьому етапі використовували розроблений метод заморожування проростків у марлевих мішечках із подальшим висаджуванням відібраних рослин у польові умови під осінній посів [21]. Такий підхід забезпечував поєднання лабораторної діагностики стійкості до низьких температур із перевіркою життєздатності та продуктивності рослин у реальних умовах вирощування.

На третьому етапі здійснювали стабілізацію селекційного матеріалу після добору за морозо- та зимостійкістю, що передбачало процес адаптації рослин до природних умов середовища. Цей етап мав важливе значення для закріплення прояву відібраних ознак та зменшення впливу короточасних адаптивних реакцій, забезпечуючи формування стабільного за фенотиповими проявами матеріалу.

Четвертий етап включав оцінку та добір генотипів в умовах *in vitro* з використанням біотехнологічних методів. На цьому етапі проводили індукцію калюсів із незрілих зародків та їх подальше розмноження. Добір *in vitro* селекційного матеріалу зернових проводився згідно попередньо розробленого способу, який захищено патентом на корисну модель [22]. Для моделювання водного дефіциту калюсні культури культивували за присутності 0,6 М маніту, який використовували як осмотичний агент. За результатами культивування здійснювали добір калюсів, здатних зберігати активний ріст і життєздатність в умовах осмотичного стресу. Надалі проводили регенерацію пагонів та отримання рослин-регенерантів, які переводили в умови *in vivo* з метою одержання насінневого покоління R<sub>1</sub>. Модифіковано та вдосконалено окремі біотехнологічні прийоми – метод стерилізації вихідного матеріалу [23] та склад живильного середовища для оптимізації укорінення регенерантів, що підвищує ефективність добору стресостійких форм.

На п'ятому етапі здійснювали остаточну стабілізацію та адаптацію селекційного матеріалу після проходження біотехнологічного добору. На цьому етапі оцінювали життєздатність, рівень адаптації та здатність відібраних генотипів до формування повноцінного насінневого потомства, що дозволяло завершити цикл комплексного добору матеріалу з підвищеною стійкістю до абіотичних стресових чинників [24].

Таким чином, представлена схема відображає інтегрований підхід до оцінювання стресостійкості зернових культур, що поєднує класичні польові методи з лабораторними та біотехно-

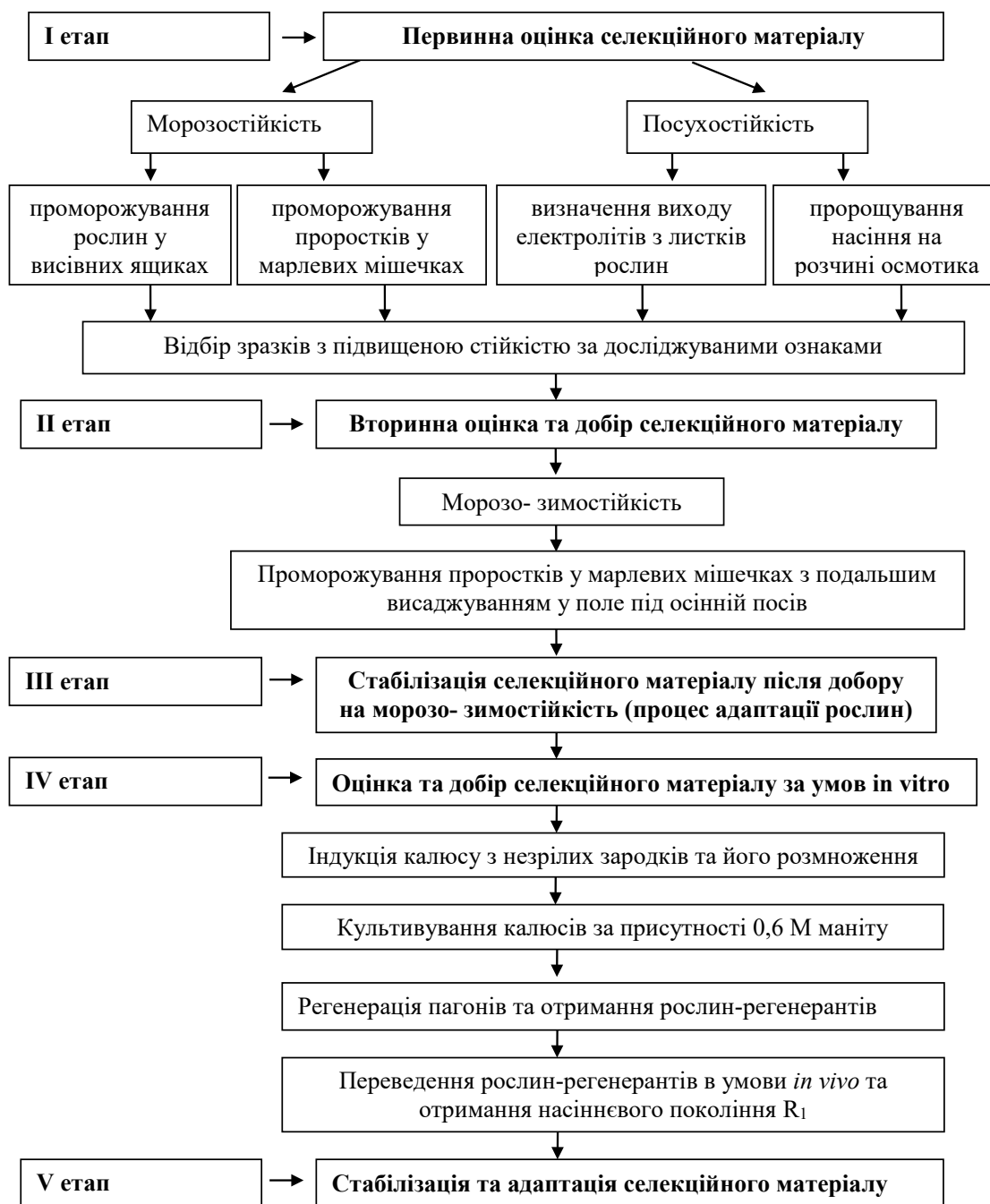


Рис. 1. Схема комплексної оцінки та добору селекційного матеріалу озимих зернових культур за показниками адаптації

гічними підходами *in vitro*, забезпечуючи підвищення ефективності добору генотипів із високим рівнем адаптивності та стабільності продуктивності. Експериментально підтверджено доцільність і ефективність застосованих методів дослідження на різних етапах розвитку рослин пшениці м'якої озимої, що забезпечує комплексну оцінку адаптивного потенціалу сортів. Виявлено сильну кореляцію між посухостійкістю на стресовому середовищі з манітом і масою 1000 зерен ( $r = 0,71$ ), а також між адаптивністю за врожайністю та посухостійкістю

на манітовому середовищі ( $r = 0,66$ ). Встановлено помірний позитивний зв'язок між морозостійкістю рослин після проморожування в ящиках і посухостійкістю на середовищі з манітом ( $r = 0,61$ ), між адаптивністю за врожайністю та посухостійкістю за пророщування насіння на сахарозі ( $r = 0,54$ ), а також між масою 1000 зерен і посухостійкістю за пророщування на субстраті з сахарозою ( $r = 0,50$ ). Шляхом комплексного вивчення сортів пшениці м'якої озимої в умовах *in vitro* та *in vivo* за цінними господарськими ознаками, виокремлено джерела з проявом

адаптивних властивостей у поєднанні з підвищеною продуктивністю та стійкістю до абіотичних стресових чинників довкілля.

**Головні висновки.** Запропоновані методичні підходи дозволяють істотно скоротити терміни добору вихідного матеріалу, підвищити ефективність оцінювання та створення нових сортів зернових культур з високим рівнем стійкості до посухи та низьких температур. Розроблені методи дають можливість об'єктивно характеризувати рівень стійкості перспективних генотипів зернових культур та прогнозувати їхню поведінку у відповідних екологічних умовах. Показано, що за результатами комплексного оцінювання між основними адаптивними та господарсько-цінними ознаками пшениці м'якої озимої існують тісні позитивні кореляційні взаємозв'язки. Створено та впроваджено методичні рекомендації, які поєднують лабораторні та біотехнологічні методи, а також ряд патентів на корисну модель. Представлені напрацювання мають вагомое практичне значення для сучасної селекції зернових в умовах кліматичних змін, що супроводжуються

частими посухами, температурними коливаннями та погіршенням водно-сольового режиму ґрунтів. Практична цінність проведених досліджень полягає у створенні цілісної науково-технологічної основи для скорочення строків селекційного добору стійких сортів, забезпечення стабільного виробництва якісного продовольчого зерна, підвищення конкурентоспроможності української пшениці на світовому ринку та зміцнення продовольчої безпеки держави.

**Перспективи використання результатів дослідження.** Матеріали дослідження можуть бути використані для подальшого добору вихідних форм у селекційних програмах, спрямованих на підвищення посухо-, морозостійкості пшениці м'якої озимої та розробці методів оцінки на різних етапах розвитку рослин. Розроблена методика оцінювання створює передумови для переорієнтації селекційних програм на розробку високопродуктивних, адаптивних і конкурентоспроможних сортів зернових культур, здатних забезпечити стабільний розвиток зернового сектору України в умовах глобальних кліматичних змін.

### Література

1. Гамаюнова В.В., Корхова М.М., Панфілова А.В. та ін. Пшениця озима: ресурсний потенціал та технологія вирощування. Миколаїв: МНАУ, 2021. 300 с.
2. Рибалка О.І. Геноміка, транскриптоміка, протеоміка і біоінформатика на службі сучасної селекції пшениці. *Збірник наукових праць Селекційно-генетичного інституту – Національного центру насіннєзнавства та сортовивчення*. 2013. Вип. 21 (61). С. 18–38.
3. Johansson E., Muneer F., Prade T. Plant breeding to mitigate climate change – present status and opportunities with an assessment of winter wheat cultivation in Northern Europe as an example. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. Iss. 16. 12349. <https://doi.org/10.3390/su151612349>
4. Zahra N., Hafeez M. B., Wahid A. et al. Impact of climate change on wheat grain composition and quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2023. Vol. 103. Iss. 6. P. 2745–2751. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12289>
5. Tadesse W., Sanchez-Garcia M., Assefa S. G. et al. Genetic gains in wheat breeding and its role in feeding the world. *Crop Breeding, Genetics and Genomics*. 2019. Vol. 1. e190005. <https://doi.org/10.20900/cbagg20190005>
6. Моргун В.В., Дубровна О.В., Моргун Б.В. Сучасні біотехнології отримання стійких до стресів рослин пшениці. *Фізіологія рослин і генетика*. 2016. Т. 48. № 3. С. 196–214.
7. Robles-Zazueta C.A., Crespo-Herrera L.A., Piñera-Chavez F.J. et al. Climate change impacts on crop breeding: Targeting interacting biotic and abiotic stresses for wheat improvement. *The Plant Genome*. 2024. Vol. 17. Iss. 1. e20365. <https://doi.org/10.1002/trg2.20365>
8. Raveena, Bharti R., Chaudhary N. Drought resistance in wheat (*Triticum aestivum* L.): a review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2019. Vol. 8. No 9. P. 1780–1792. <https://doi.org/10.20546/ijemas.2019.809.206>
9. Cui J., Ding J., Deng S. et al. Wheat breeding strategies under climate change based on CERES-Wheat model. *Computers, Materials & Continua*. 2022. Vol. 72. Iss. 3. P. 6107–6118. <https://doi.org/10.32604/cmc.2022.027611>
10. Васильківський С.П., Гудзенко В.М., Кочмарський В.С., Кириленко В.В. Реалізація потенціалу сортів зернових культур – шлях вирішення продовольчої проблеми. *Фактори експериментальної еволюції організмів*. 2017. Т. 21. С. 47–51. <https://doi.org/10.7124/FEEO.v21.805>
11. Дубовик Н.С., Кириленко В.В., Дергачов О.Л. Вихідний матеріал для селекції пшениці м'якої озимої за пластичністю та стабільністю. *Вісник ЦНЗ АПВ Харківської області*. 2015. Вип. 18. С. 132–138.
12. Близнюк Б.В., Демидов О.А., Кириленко В.В. та ін. Вплив агроекологічних чинників і сортових особливостей на врожайність та якість зерна пшениці м'якої озимої. *Агроекологічний журнал*. 2019. № 1. С. 62–73.
13. Балабух В.О. Однолеток Л.П., Кривошеїн О. Вплив зміни клімату на продуктивність озимої пшениці в Україні у періоди вегетаційного циклу. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2017. № 3 (46). С. 72–85.
14. Дубровна О.В., Моргун Б.В., Бавол А.В. Біотехнології пшениці: клітинна селекція та генетична інженерія. Київ: Логос, 2014. 375 с.
15. Дубровна О.В., ЧуGUNКОВА Т.В., Бавол А.В., Лялько І.І. Біотехнологічні та цитогенетичні основи створення рослин, стійких до стресів. Київ: Логос, 2012. 428 с.
16. Dodig D., Zorić M., Mitić N. et al. Tissue culture and agronomic traits relationship in wheat. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. 2008. Vol. 95. N 1. P. 107–114.
17. Dubrovna O.V., Baval A.V. Variability of the wheat genome during *in vitro* culture. *Cytology & Genetics*. 2011. Vol. 45. No 5. P. 333–340.

18. Оцінка та добір генотипів зернових на стійкість до абіотичних стресів. Методичні рекомендації / Демидов О.А., Кириленко В.В., Юрченко Т.В. та ін. Миронівка, 2024. 30 с.
19. Пикало С.В., Демидов О.А., Юрченко Т.В. та ін. Методи оцінки морозостійкості селекційного матеріалу пшениці. *Екологічні науки*. 2021. № 2(35). С. 82–89. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.2-35.14>
20. Пикало С., Демидов О., Юрченко Т. та ін. Методи оцінки посухостійкості селекційного матеріалу пшениці. *Вісник Львівського університету. Серія біологічна*. 2020. Вип. 82. С. 63–79. <https://doi.org/10.30970/vlubs.2020.82.05>
21. Спосіб оцінювання та добору морозостійкого селекційного матеріалу озимих зернових культур: пат. 153824 Україна: МПК А01Н 1/04. № 202202833; заявл. 08.08.2022; опубл. 06.09.2023, Бюл. № 36. 5 с.
22. Спосіб відбору *in vitro* посухостійких генотипів тритикале озимого: пат. 132656 Україна: МПК А01Н 4/00. № 201807903; заявл. 16.07.2018; опубл. 11.03.2019, Бюл. № 5. 4 с.
23. Спосіб стерилізації незрілого насіння пшениці та тритикале для введення в культуру *in vitro*: пат. 152327 Україна: МПК А01Н 1/00. № 202202662, заявл. 25.07.2022; опубл. 11.01.2023 р., Бюл. № 2. 5 с.
24. Спосіб оцінки стійкості генотипів тритикале озимого до комплексу абіотичних стресових чинників: пат. 145334 Україна: МПК А01Н 1/04. № 201911575; заявл. 02.12.2019. опубл. 10.12.2020 р. Бюл. № 23. 5 с.

Дата першого надходження статті до видання: 29.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026

## НАКОПИЧЕННЯ ZN У НАДЗЕМНІЙ МАСІ БАГАТОРІЧНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР НА РІЗНИХ ТИПАХ ҐРУНТІВ

Разанов С.Ф.<sup>1</sup>, Алексєєв О.О.<sup>2</sup>, Бахмат О.М.<sup>3</sup>, Крілевич В.Р.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Ґжицького

вул. Пекарська, 50, 79010, м. Львів

<sup>2</sup>Вінницький національний аграрний університет

вул. Сонячна, 3, 21008, м. Вінниця

<sup>3</sup>Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»

вул. Шевченка, 12, 32316, м. Кам'янець-Подільський

[razanovsergej65@gmail.com](mailto:razanovsergej65@gmail.com), [alekseev\\_oleksiy@ukr.net](mailto:alekseev_oleksiy@ukr.net)

У статті здійснено оцінку вмісту цинку (Zn) у надземній вегетативній масі багаторічних енергетичних культур за вирощування на ґрунтах різного типу впродовж 2023–2025 років. Дослідження спрямовано на порівняльний аналіз накопичення Zn у біомасі міскантусу (*Miscanthus*), мальви пенсільванської (*Sida hermaphrodita* (L.) Rusby) та сільфії пронизанолистого (*Silphium perfoliatum* L.) на сірому лісовому, чорноземі типовому та дерново-підзолистому піщаному ґрунтах. Отримані у ході дослідження експериментальні дані дали змогу охарактеризувати міжрічну мінливість і ґрунтову специфіку акумуляції елемента. Для оцінки потенційної небезпеки розраховано коефіцієнт небезпеки Zn (Кн) як відношення фактичного вмісту до допустимого рівня (ДР) та проведено порівняння показників між роками і ґрунтовими групами.

Встановлено, що у всі роки досліджень і для всіх типів ґрунтів вміст Zn у надземній масі досліджених культур був істотно нижчим за ДР, а значення Кн залишалися суттєво меншими за 1, що свідчить загалом про безпечність біомаси за показником Zn. Виявлено виразну міжрічну динаміку, зокрема, у 2024 році зафіксовано найбільше підвищення концентрацій Zn і відповідних значень Кн порівняно з 2023 роком, тоді як у 2025 році зміни мали різноспрямований характер залежно від культури та типу ґрунту. Порівняльний аналіз показав видоспецифічні особливості акумуляції, зокрема, для міскантусу найвищі середні рівні Zn формувалися на сірому лісовому ґрунті (за узагальненням 2023–2025 рр.), тоді як для мальви пенсільванської та сільфії пронизанолистого максимальні значення частіше спостерігали на дерново-підзолистому піщаному ґрунті; найнижчі рівні накопичення переважно були характерні для чорнозему типового. Отримані результати мають практичне значення для екологічного контролю якості надземної біомаси багаторічних культур і обґрунтування безпечності її використання, а також можуть бути застосовані для вдосконалення системи агроекологічного моніторингу складу рослинної продукції на ґрунтах різних типів та оптимізації розміщення плантацій багаторічних енергетичних культур з урахуванням ґрунтових умов і міжрічної мінливості. *Ключові слова*: міскантус, мальва пенсільванська, сільфій пронизанолистий, ґрунт, вегетативна маса, елемент, коефіцієнт небезпеки.

**Zn accumulation in aboveground biomass of perennial energy crops on different soil types. Razanov S., Aliexsieiev O., Bakhmat O., Krilevych V.**

The study assessed zinc (Zn) concentrations in the aboveground vegetative biomass of perennial energy crops grown on different soil types during 2023–2025. The research focused on a comparative analysis of Zn accumulation in the biomass of giant miscanthus (*Miscanthus*), Virginia mallow (*Sida hermaphrodita* (L.) Rusby), and cup plant (*Silphium perfoliatum* L.) cultivated on grey forest soil, typical chernozem, and sod-podzolic sandy soil. The experimental data obtained made it possible to characterize interannual variability and soil-specific features of Zn accumulation. To evaluate potential risk, the Zn hazard coefficient (Hc) was calculated as the ratio of the measured concentration to the permissible level, and the indicators were compared across years and soil groups.

It was found that in all study years and for all soil types, Zn concentrations in the aboveground biomass of the investigated crops were substantially lower than the permissible level, and Hc values remained well below 1, indicating compliance with regulatory standards of the biomass with respect to Zn content. A pronounced interannual pattern was identified: the highest Zn concentrations and corresponding Hc values were recorded in 2024 compared with 2023, whereas in 2025 the changes were multidirectional depending on crop species and soil type. Comparative analysis revealed species-specific accumulation patterns: for miscanthus, the highest mean Zn levels (based on 2023–2025 averages) were observed on grey forest soil, whereas for Pennsylvania mallow and cup plant the highest values were more often recorded on sod-podzolic sandy soil; the lowest accumulation levels were predominantly associated with typical chernozem. The obtained results have practical value for environmental control of aboveground biomass quality in perennial crops and for substantiating the safety of its use. They can also be applied to improve agroecological monitoring of the elemental composition of plant products across different soil types and to optimize the placement of perennial energy crop plantations with regard to soil conditions and interannual variability. *Key words*: miscanthus, Virginia mallow, cup plant, soil, vegetative biomass, element, hazard coefficient.



**Постановка проблеми.** Склад рослинної біомаси є одним із ключових показників екологічної якості агрофітоценозів і безпечності подальшого використання продукції. Цинк (Zn) належить до життєво необхідних для рослин елементів, однак за певних ґрунтових умов його надходження та накопичення можуть істотно змінюватися, що зумовлює коливання концентрацій у надземній масі [1, 2]. У практиці вирощування багаторічних енергетичних культур це питання набуває особливого значення, оскільки біомаса використовується як сировина для біоенергетичних і технічних потреб, а стабільність її елементного складу визначає екологічні ризики, технологічні параметри переробки та вимоги до контролю якості [3, 4].

Водночас інтенсивність акумуляції Zn у рослинній масі формується не лише видовими особливостями, а й комплексом ґрунтових чинників, зокрема, типом ґрунту, реакцією середовища, вмістом органічної речовини, гранулометричним складом та доступністю рухомих форм елемента. Додаткову складність створює міжрічна мінливість, пов'язана з відмінностями гідротермічних умов вегетаційного періоду, яка здатна змінювати доступність мікроелементів і, відповідно, їх надходження в надземні органи [5]. У результаті навіть за однакової технології вирощування показники вмісту Zn можуть суттєво різнитися між роками та ґрунтовими групами.

Незважаючи на актуальність проблеми, для багаторічних культур, що набувають поширення в сучасному землекористуванні (міскантус, мальва пенсільванська, сильфій пронизанолистий), залишається недостатньо узагальнених даних щодо накопичення Zn у надземній вегетативній масі на ґрунтах різних типів у багаторічному циклі спостережень. Окремим практичним аспектом є потреба у зіставленні отриманих концентрацій із нормативними даними та використанні кількісних індикаторів (наприклад, коефіцієнта небезпеки) для оцінки можливих ризиків. Отже, необхідним є системний аналіз вмісту Zn у біомасі зазначених культур у динаміці років та за контрастних ґрунтових умов, що дозволить обґрунтувати екологічну безпечність біомаси й сформулювати підходи до моніторингу її елементного складу.

**Актуальність дослідження.** Багаторічні культури біоенергетичного та технічного напрямку (міскантус, мальва пенсільванська, сильфій пронизанолистий) дедалі ширше впроваджуються у сучасне землекористування завдяки високій продуктивності та здатності формувати значні обсяги надземної біомаси [6]. Водночас екологічна якість такої сировини визначається не лише виходом біомаси, а й її елементним складом, який може суттєво змінюватися залежно від типу ґрунту та умов року. Особливе значення має контроль вмісту мікроелементів, зокрема цинку (Zn), що є необхідним для рослин, проте за певних ґрунтово-екологічних умов

може інтенсивніше акумулюватися в надземних органах і впливати на безпечність та технологічні властивості біомаси [7].

Актуальність дослідження посилюється тим, що ґрунти різного типу (сірі лісові, чорноземи типові, дерново-підзолисті піщані) істотно відрізняються за фізико-хімічними характеристиками та доступністю рухомих форм елементів, що формує різні особливості надходження Zn у рослинну масу. Додатково міжрічна мінливість гідротермічних умов здатна змінювати інтенсивність поглинання мікроелементів і зумовлювати різноспрямовані коливання концентрацій у біомасі, навіть за незмінної технології вирощування. За таких умов своєчасне вивчення накопичення Zn у надземній вегетативній масі багаторічних культур та порівняння отриманих значень із допустимими рівнями є необхідним для обґрунтованої екологічної оцінки сировини.

Практична значущість полягає в тому, що результати можуть бути використані для удосконалення агроекологічного моніторингу елементного складу біомаси, вибору оптимальних ґрунтових умов для розміщення плантацій багаторічних культур та підвищення екологічної безпечності виробництва біомаси, орієнтованого на сталий розвиток і зниження потенційних ризиків для довкілля.

**Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.** На відміну від значної кількості публікацій, у яких оцінювання якості біомаси багаторічних культур обмежується показниками врожайності та енергетичної продуктивності, у цьому дослідженні акцент зроблено на еколого-нормативній оцінці елементного складу надземної вегетативної маси з використанням кількісного індикатора ризику (коефіцієнта небезпеки (Kn) [8]. Такий підхід дозволяє не лише фіксувати рівні накопичення Zn у біомасі, але й порівнювати їх із допустимим рівнем, забезпечуючи інтерпретацію результатів з позицій екологічної безпечності. Дослідження виконано у форматі багаторічних спостережень (2023–2025 рр.) на різних типах ґрунтів (сірий лісовий, чорнозем типовий, дерново-підзолистий піщаний ґрунт) із залученням трьох поширених багаторічних культур (*Miscanthus*, *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby, *Silphium perfoliatum* L.). Це забезпечило можливість оцінити міжрічну мінливість та ґрунтову специфіку акумуляції Zn, що є важливим науковим завданням у контексті розвитку агроекології, екотоксикології та моніторингу складу рослинної продукції.

Практична значущість отриманих результатів полягає у їх придатності для екологічного контролю якості біомаси та оптимізації розміщення плантацій багаторічних культур з урахуванням типу ґрунту й міжрічних коливань показників. Матеріали дослідження можуть бути використані для удосконалення системи агроекологічного моніторингу складу рослинної сировини, а також для обґрунтування еко-

логічно безпечного виробництва біомаси в межах принципів сталого землекористування.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Питання вмісту мікроелементів і потенційно токсичних елементів у біомасі рослин посідає важливе місце в сучасній агроекології та екологічній безпеці продукції. Цинк (Zn) розглядають як необхідний для рослин мікроелемент, який бере участь у ферментативних процесах і підтриманні метаболізму, проте його вміст у надземних органах істотно варіює залежно від ґрунтових умов, агротехнологій та метеорологічних чинників року [9]. У науковій літературі підкреслюється, що саме поєднання ґрунт–рослина–середовище визначає реальний рівень надходження Zn у біомасу та формує ризики відхилення показників від нормативно прийнятних значень [10].

Окремий напрям досліджень пов'язаний із багаторічними культурами, які використовують як джерело біомаси, зокрема, для біоенергетики та технічної сировини [6]. Для таких культур характерні довготривале функціонування кореневої системи, сезонні зміни інтенсивності поглинання елементів та відмінності у внутрішньорослинному перерозподілі мікроелементів. У публікаціях, присвячених багаторічним трав'янистим культурам, наголошується, що здатність акумулювати Zn у надземній масі є видоспецифічною і може відрізнитися навіть за близьких ґрунтових умов, що зумовлює необхідність проведення порівняльних досліджень [11].

Встановлено, що тип ґрунту є одним із ключових чинників, який регулює доступність елементів, зокрема, Zn для рослин. Фізико-хімічні характеристики (реакція середовища, вміст органічної речовини, гранулометричний склад, сорбційні властивості) визначають частку рухомих форм елемента та, відповідно, інтенсивність його надходження в рослини [4]. У цьому контексті важливими є дослідження, що порівнюють накопичення елементів на різних ґрунтах, оскільки саме такі підходи дозволяють коректно оцінити роль ґрунтового середовища. Також у практиці екологічної оцінки продукції поширеним підходом є використання відносних показників, наприклад, коефіцієнтів небезпеки, які дозволяють порівнювати дані між роками, культурами та ґрунтовими групами і формувати висновки щодо наближення до допустимих рівнів [12]. Така інтерпретація є особливо важливою для рослинної біомаси, що планується до подальшого використання у якості сировини.

Отже, попри наявність наукових досліджень щодо накопичення мікроелементів у рослинній біомасі, залишається недостатньо дослідженим комплекс питань, пов'язаних із порівняльною багаторічною (за роками) оцінкою вмісту Zn у надземній вегетативній масі багаторічних енергетичних культур на різних типах ґрунтів із одночасним застосуванням нормативного підходу та коефіцієнта небезпеки.

#### **Невирішені частини загальної проблеми.**

Попри значну кількість робіт, присвячених вмісту мікроелементів у рослинах, залишається невирішеним питання щодо динаміки вмісту Zn у надземній вегетативній масі багаторічних енергетичних культур у різні роки вегетації за подібних технологій вирощування. Також недостатньо даних щодо оцінки накопичення Zn залежно від типу ґрунту та реакції досліджуваних культур на ці умови. Саме ці недостатньо висвітлені питання (міжрічна динаміка, відмінності між типами ґрунтів і оцінка вмісту Zn відносно допустимих нормативів) розглянуто в цій статті.

**Новизна.** У межах дослідження вперше виконано багаторічну (2023–2025 рр.) порівняльну оцінку вмісту цинку (Zn) у надземній вегетативній масі трьох багаторічних енергетичних культур (міскантусу, мальви пенсільванської, сільфію пронизанолистого) за вирощування на трьох типах ґрунтів (сірий лісовий, чорнозем типовий, дерново-підзолистий піщаний). Важливим аспектом також є застосування коефіцієнта небезпеки (Кн) як кількісного показника наближення фактичного вмісту Zn у біомасі рослин до допустимого рівня (ДР) для порівняння між роками, різними типами ґрунтів і видами культур, що дозволило зафіксувати рівні накопичення Zn та підвищити інформативність дослідження для агроекологічного моніторингу й обґрунтування безпечності надземної біомаси багаторічних енергетичних культур.

#### **Методологічне або загальнонаукове значення.**

Дослідження поглиблює розуміння закономірностей накопичення мікроелементів у системі «ґрунт–рослина» та ролі типу ґрунту й міжрічної мінливості умов вегетації у формуванні елементного складу надземної біомаси багаторічних культур. Методологічне значення полягає у можливості використання запропонованого підходу як універсальної схеми для порівняння різних культур і ґрунтових умов у багаторічних дослідженнях, а також для формування системи моніторингу елементного складу біомаси, придатної для практичного застосування. У загальнонауковому аспекті результати є важливими для агроекології, ґрунтознавства, екологічної безпеки та сталого землекористування, оскільки забезпечують наукове обґрунтування планування вирощування багаторічних енергетичних культур і контролю якості біомаси за вмістом мікроелементів.

**Виклад основного матеріалу.** Тип ґрунту, його фізико-хімічні властивості й режим зволоження здатні істотно змінювати частку рухомих форм Zn, а отже формувати відмінності у вмісті елемента в біомасі навіть за однакової технології вирощування. Тому аналіз вмісту Zn у динаміці років і за різних ґрунтових умов є необхідним для коректної оцінки екологічної якості біомаси та її відповідності нормативним вимогам. У таблиці 1 наведено результати визначення вмісту цинку (Zn) у надземній вегетативній масі міскантусу за різних типів ґрунтів (2023–2025 рр.).

Таблиця 1

Вміст Zn у надземній вегетативній масі міскантусу, мг/кг

Тип ґрунту	Роки досліджень						ДР
	2023		2024		2025		
	Фактичний вміст	У середньому по варіантах досліджу	Фактичний вміст	У середньому по варіантах досліджу	Фактичний вміст	У середньому по варіантах досліджу	
Сірий лісовий	7,21	7,0±0,07	14,91	14,70 ±0,14	12,57	12,57±,0,21	50
	6,94		14,72		13,16		
	6,87		14,86		12,33		
	6,99		14,31		12,21		
Чорнозем типовий	6,48	6,34±0,06	15,90	15,87±0,05	6,30	6,28±0,16	50
	6,30		15,83		6,72		
	6,22		15,98		6,14		
	6,37		15,75		5,95		
Дерново-підзолистий піщаний	6,74	6,67±0,07	16,70	16,61±0,07	8,50	8,45±0,23	50
	6,60		16,40		9,03		
	6,51		16,63		8,37		
	6,81		16,72		7,91		

Наведені в таблиці 1 дані свідчать, що вміст Zn у надземній вегетативній масі міскантусу істотно залежав як від року досліджень, так і від типу ґрунту. Так, у 2023 р. показники були відносно низкими та близькими між ґрунтовими групами, тоді як у 2024 р. зафіксовано різке підвищення в усіх варіантах. У 2025 р. вміст Zn знову знизився на чорноземі типовому та дерново-підзолистому піщаному ґрунті, водночас на сірому лісовому ґрунті він залишався підвищеним (12,57 ± 0,21 мг/кг).

Порівняння між ґрунтами в межах кожного року показало, що у 2023 р. найвищий середній вміст Zn спостерігали на сірому лісовому ґрунті, найнижчий – на чорноземі типовому, а дерново-підзолистий піщаний займав проміжне положення. У 2024 р. максимальні значення були характерні для дерново-підзолистого піщаного та чорнозему типового, тоді як на сірому лісовому ґрунті відмічено нижчий рівень. У 2025 р. контраст між групами посилювався, зокрема, сірий лісовий ґрунт перевищував чорнозем типовий у 2 рази, а дерново-підзолистий піщаний – у 1,35 рази відносно чорнозему.

Щодо відповідності допустимому рівню, у всі роки та для всіх типів ґрунтів вміст Zn був суттєво нижчим за ДР. Частка від ДР становила, зокрема, для сірого лісового 14,00% (2023), 29,40% (2024), 25,14% (2025); для чорнозему типового – 12,68%, 31,74%, 12,56%; для дерново-підзолистого піщаного – 13,34%, 33,22%, 16,90%. Максимальне середнє значення (дерново-підзолистий піщаний, 2024) було нижчим за ДР у 3,0 рази, що підтверджує відсутність перевищень нормативу упродовж усього періоду спостережень.

Для узагальнення міжрічної динаміки та виявлення відмінностей між типами ґрунтів на рисунку 1 наведено середні за 2023–2025 рр. значення вмісту цинку (Zn) у надземній вегетативній масі міскантусу, мг/кг сухої речовини. Як видно з рис. 1, максимальний середній вміст Zn у надземній вегетативній масі міскантусу (за 2023–2025 рр.) встановлено на сірому лісовому ґрунті, що свідчить про найвищу інтенсивність надходження елемента в надземній біомасі за цих умов. На дерново-підзолистому піщаному ґрунті показник був дещо нижчим, тобто на 0,92 мг/кг (8,1%) менше порівняно із сірим лісовим ґрунтом. Найменший середній вміст Zn зафіксовано на чорноземі типовому, зокрема він був на 1,93 мг/кг (16,9%) нижчий від значення на сірому лісовому та на 1,01 мг/кг (9,6%) нижчий порівняно з дерново-підзолистим піщаним ґрунтом.

Загалом типи ґрунтів за середньою здатністю забезпечувати накопичення Zn у надземній масі міскантусу розташовуються в такій послідовності: сірий лісовий > дерново-підзолистий піщаний > чорнозем типовий.

Як видно з рис. 2, середній коефіцієнт небезпеки Zn (Кн) у надземній вегетативній масі міскантусу змінювався залежно від типу ґрунту та залишався на відносно низькому рівні порівняно з допустимим.

Так, максимальне значення зафіксовано на сірому лісовому ґрунті, що відповідає близько 22% від ДР. На дерново-підзолистому піщаному ґрунті показник був дещо нижчим, тоді як мінімальний рівень відмічено на чорноземі типовому (19% від ДР). У середньому за 2023–2025 рр. типи ґрунтів за величиною Кн розташовувалися в такій послі-

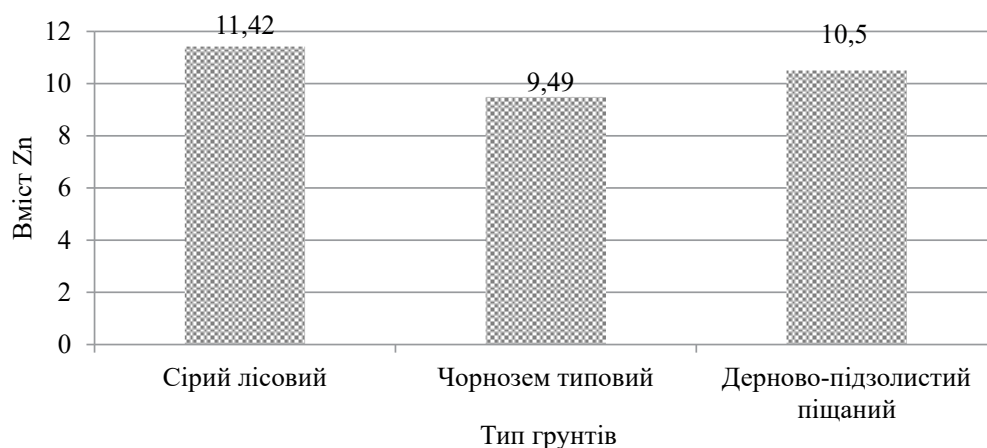


Рис. 1. Вміст Zn у надземній вегетативній масі міскантусу в середньому за 2023-2025 рр., мг/кг



Рис. 2. Коефіцієнт небезпеки Zn у надземній вегетативній масі міскантусу

довності: сірий лісовий > дерново-підзолистий піщаний > чорнозем типовий. Загалом упродовж 2023–2025 рр. для всіх типів ґрунтів Кн був суттєво меншим за 1, що свідчить про відсутність наближення вмісту Zn у надземній масі міскантусу до допустимого рівня.

У таблиці 2 наведено результати визначення вмісту цинку (Zn) у надземній вегетативній масі мальви пенсільванської за різних типів ґрунтів у 2023–2025 рр. Дані таблиці демонструють виражену залежність накопичення Zn у надземній вегетативній масі мальви пенсільванської як від року досліджень, так і від типу ґрунту. Загальна тенденція для всіх ґрунтових груп є зростання вмісту Zn у 2025 р. порівняно з 2023–2024 рр., тоді як між 2023 і 2024 рр. зміни були переважно помірними. Зокрема, у сірому лісовому ґрунті середній вміст Zn у 2023–2024 рр. залишався близьким ( $8,34 \pm 0,28 \rightarrow 8,50 \pm 0,11$  мг/кг), але в 2025 р. різко підвищився до  $13,45 \pm 0,20$  мг/кг, що вказує на посилення акумуляції елемента в надземній біомасі. На чорноземі типовому у 2024 р. відмічено зниження відносно

2023 р. ( $8,48 \pm 0,08 \rightarrow 8,20 \pm 0,12$  мг/кг), натомість у 2025 р. показник зріс до  $9,75 \pm 0,11$  мг/кг. Для дерново-підзолистого піщаного ґрунту характерними були найвищі значення у 2023 р. ( $9,88 \pm 0,15$  мг/кг) і найбільша варіабельність у 2024 р. ( $9,47 \pm 0,49$  мг/кг), після чого у 2025 р. зафіксовано істотне підвищення до  $13,57 \pm 0,20$  мг/кг.

Також порівняння між типами ґрунтів у межах кожного року показало, що в 2023 р. максимальні значення спостерігали на дерново-підзолистому піщаному ґрунті, тоді як на сірому лісовому та чорноземі типовому показники були нижчими і близькими між собою. У 2024 р. дерново-підзолистий піщаний ґрунт також характеризувався найвищим середнім вмістом Zn, сірий лісовий займав проміжне положення, а мінімальні значення відмічено на чорноземі типовому. У 2025 р. відмінності між ґрунтами посилювалися, зокрема, найвищі значення встановлено на дерново-підзолистому піщаному ( $13,57 \pm 0,20$  мг/кг) та сірому лісовому ґрунті ( $13,45 \pm 0,20$  мг/кг), тоді як на чорноземі типовому рівень був істотно нижчим ( $9,75 \pm 0,11$  мг/кг).

Таблиця 2

**Вміст Zn у надземній вегетативній масі мальви пенсільванської, мг/кг**

Тип ґрунту	Роки досліджень						ДР
	2023		2024		2025		
	Фактичний вміст	У середньому по варіантах досліджу	Фактичний вміст	У середньому по варіантах досліджу	Фактичний вміст	У середньому по варіантах досліджу	
Сірий лісовий	8,73	8,34±0,28	8,60	8,50±0,11	13,93	13,45±0,20	50
	8,91		8,74		13,55		
	7,79		8,42		13,37		
	7,94		8,24		12,96		
Чорнозем типовий	8,44	8,48±0,08	8,08	8,20±0,12	9,72	9,74±0,11	50
	8,34		7,93		10,05		
	8,71		8,34		9,68		
	8,44		8,47		9,53		
Дерново-підзолистий піщаний	9,44	9,88±0,15	8,39	9,47±0,9	13,60	13,57±0,20	50
	10,04		9,73		14,09		
	10,09		10,70		13,48		
	9,93		9,04		13,12		

Зіставлення з допустимим рівнем засвідчило, що у всі роки та для всіх типів ґрунтів вміст Zn залишався значно нижчим за норматив. Частка від ДР становила: для сірого лісового 16,68% (2023), 17,00% (2024), 26,90% (2025); для чорнозему типового – 16,96%, 16,40%, 19,50%; для дерново-підзолистого піщаного – 19,76%, 18,94%, 27,14%. Максимальні значення 2025 р. (дерново-підзолистий піщаний і сірий лісовий ґрунти) відповідали лише близько 27% від ДР, тобто були нижчими за допустимий рівень приблизно у 3,7 рази. Отже, отримані результати підтверджують відсутність перевищень ДР протягом 2023–2025 рр. та підкреслюють, що саме 2025 р. характеризувався найбільш інтенсивним накопиченням Zn у надземній масі мальви пенсільванської, особливо на сірому лісовому й дерново-підзолистому піщаному ґрунтах.

Для узагальнення міжрічних змін і порівняння впливу ґрунтових умов на акумуляцію Zn в надземній біомасі, на рисунку 3 наведено середні за 2023–2025 рр. значення вмісту Zn у надземній вегетативній масі мальви пенсільванської (мг/кг сухої речовини) для трьох типів ґрунтів.

Так, найвищий середній вміст Zn встановлено на дерново-підзолистому піщаному ґрунті (10,96 мг/кг). На сірому лісовому ґрунті показник був дещо нижчим і становив 10,09 мг/кг, тоді як найменші значення зафіксовано на чорноземі типовому (8,80 мг/кг). Різниця між максимальним і мінімальним рівнями становила 2,16 мг/кг, що відповідає приблизно 24,5% відносно чорнозему типового. Порівняно з чорноземом типовим вміст Zn був вищим на 14,7% для сірого лісового та на 24,5% для дерново-підзолистого піщаного. Отже, за середньою інтенсивністю накопичення Zn у надземній масі мальви пенсільван-

ської типи ґрунтів розташовуються в такій послідовності: дерново-підзолистий піщаний > сірий лісовий > чорнозем типовий.

Для оцінки потенційної небезпеки накопичення цинку в надземній вегетативній масі мальви пенсільванської розраховано коефіцієнт небезпеки Zn (Кн) як відношення фактичного вмісту елемента до допустимого рівня. На рисунку 4 наведено узагальнені значення Кн для різних типів ґрунтів (чим більше Кн, тим ближчий вміст Zn до ДР; Кн < 1 означає відсутність перевищення нормативу).

Як видно з рисунка, найвищий середній коефіцієнт небезпеки встановлено на дерново-підзолистому піщаному ґрунті, що відповідає близько 22% від ДР. На сірому лісовому ґрунті показник був дещо нижчим (20% від ДР), тоді як мінімальне значення характерне для чорнозему типового (17% від ДР). Отже, типи ґрунтів за величиною Кн розташовуються в такій послідовності: дерново-підзолистий піщаний > сірий лісовий > чорнозем типовий.

Динаміка за роками (за даними табл. 2) показала, що у 2023–2024 рр. значення Кн залишалися відносно стабільними, зокрема, для сірого лісового – 0,17 → 0,17, для чорнозему типового – 0,17 → 0,16, для дерново-підзолистого піщаного – 0,20 → 0,19. У 2025 р. відмічено найвиразніше зростання показника на сірому лісовому та дерново-підзолистому піщаному ґрунтах (до 0,27), тоді як на чорноземі типовому підвищення було помірнішим (до 0,20).

У цілому протягом 2023–2025 рр. для всіх типів ґрунтів Кн залишався суттєво меншим за 1, що свідчить про відсутність наближення вмісту Zn у надземній масі мальви пенсільванської до допустимого рівня, попри посилення показника у 2025 році на окремих ґрунтах.

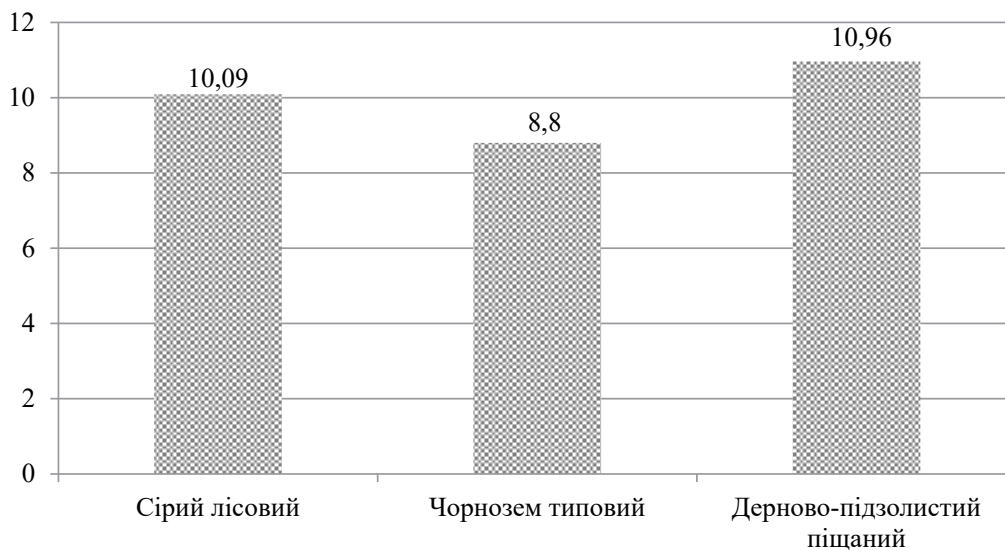


Рис. 3. Вміст Zn у надземній вегетативній масі мальви пенсільванської в середньому за 2023–2025 рр., мг/кг

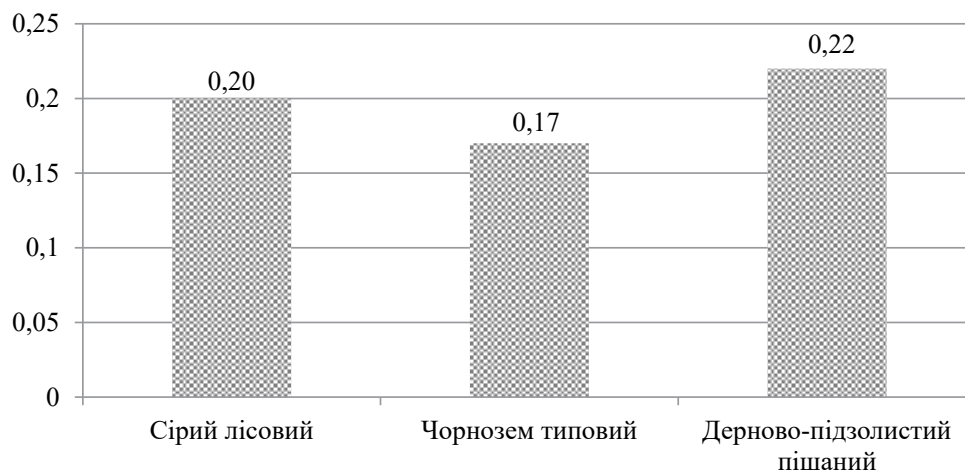


Рис. 4. Коефіцієнт небезпеки Zn у надземній вегетативній масі мальви пенсільванської

У таблиці 3 наведено результати визначення вмісту Zn у надземній вегетативній масі сільфію пронизаного за різних типів ґрунтів у 2023–2025 рр. Дані таблиці свідчать, що вміст Zn у надземній вегетативній масі сільфію пронизаного змінювався залежно від року досліджень і типу ґрунту. Загалом у 2023–2024 рр. спостерігали відносно помірні значення, тоді як у 2025 р. для більшості ґрунтових груп відмічено тенденцію до підвищення, найвиразнішу на дерново-підзолистому піщаному ґрунті.

У сірому лісовому ґрунті середній вміст Zn у 2023 р. становив  $6,54 \pm 0,05$  мг/кг, у 2024 р. зменшився до  $6,22 \pm 0,09$  мг/кг, а у 2025 р. зріс до  $7,05 \pm 0,14$  мг/кг. На чорноземі типовому значення були найнижчими в усі роки, зокрема,  $5,54 \pm 0,09$  (2023),  $5,25 \pm 0,20$  (2024) та  $5,58 \pm 0,25$  мг/кг (2025), тобто річні коливання мали обмежений характер. Для дер-

ново-підзолистого піщаного ґрунту зафіксовано найвищі рівні Zn у надземній масі сільфію, зокрема,  $7,31 \pm 0,09$  мг/кг у 2023 р., зниження до  $6,63 \pm 0,25$  мг/кг у 2024 р., а у 2025 р. різке підвищення до  $9,67 \pm 0,20$  мг/кг.

Порівняння між типами ґрунтів у межах кожного року показало, що в 2023 р. максимальний вміст Zn спостерігали на дерново-підзолистому піщаному ґрунті ( $7,31 \pm 0,09$  мг/кг), проміжні значення – на сірому лісовому ( $6,54 \pm 0,05$  мг/кг), а мінімальні – на чорноземі типовому ( $5,54 \pm 0,09$  мг/кг). У 2024 р. зберігалася аналогічна закономірність ( $6,63 \pm 0,25 > 6,22 \pm 0,09 > 5,25 \pm 0,20$  мг/кг). У 2025 р. контраст між ґрунтами посилюється, зокрема, дерново-підзолистий піщаний ґрунт ( $9,67 \pm 0,20$  мг/кг) істотно перевищував сірий лісовий ( $7,05 \pm 0,14$  мг/кг) і чорнозем типовий ( $5,58 \pm 0,25$  мг/кг).

Таблиця 3

Вміст Zn у надземній вегетативній масі сільфію пронизанолистого, мг/кг

Тип ґрунтів	Роки досліджень						ДР
	2023		2024		2025		
	Фактичний вміст	У середньому по варіантах досліджу	Фактичний вміст	У середньому по варіантах досліджу	Фактичний вміст	У середньому по варіантах досліджу	
Сірий лісовий	6,41	6,54±0,05	6,04	6,22±0,09	7,05	7,05±0,14	50
	6,62		6,31		7,43		
	6,51		6,11		6,92		
	6,60		6,42		6,79		
Чорнозем типовий	5,56	5,54±0,09	5,03	5,25±0,20	5,65	5,58±0,25	50
	5,63		5,44		6,18		
	5,70		4,83		5,54		
	5,27		5,71		4,95		
Дерново-підзолистий піщаний	7,34	7,31±0,09	7,08	6,63±0,25	9,75	9,67±0,20	50
	7,07		6,38		10,18		
	7,51		6,04		9,53		
	7,31		7,03		9,21		

Зіставлення з допустимим рівнем (ДР) засвідчило, що в усі роки та для всіх типів ґрунтів вміст Zn був значно нижчим за норматив. Частка від ДР для сірого лісового становила 13,08% (2023), 12,44% (2024), 14,10% (2025); для чорнозему типового – 11,08%, 10,50%, 11,16%; для дерново-підзолистого піщаного – 14,62%, 13,26%, 19,34%. Максимальне значення (дерново-підзолистий піщаний ґрунт, 2025 р.) становило лише близько 19% від ДР і було нижчим за допустимий рівень приблизно у 5,2 раза. Отже, протягом 2023–2025 рр. перевищень ДР не встановлено, а найбільш інтенсивне накопичення Zn у надземній масі сільфію пронизанолистого відмічено на дерново-підзолистому піщаному ґрунті, особливо у 2025 році.

Для узагальнення міжрічних змін і наочного порівняння впливу ґрунтових умов на накопичення цинку в надземній біомасі сільфію пронизанолистого, на рисунку 5 наведено середні за 2023–2025 рр. значення вмісту Zn у надземній вегетативній масі (мг/кг сухої речовини) для трьох типів ґрунтів.

За даними, відображеними на рисунку 5, найвищий середній вміст Zn встановлено на дерново-підзолистому піщаному ґрунті. На сірому лісовому ґрунті показник був нижчим, а мінімальне значення зафіксовано на чорноземі типовому. Різниця між максимальним і мінімальним рівнями становила 2,41 мг/кг, що відповідає приблизно 44,2% відносно чорнозему типового. Порівняно з чорноземом типовим вміст Zn був вищим на 21,1% для сірого лісового та на 44,2% для дерново-підзолистого піщаного. Отже, за середньою інтенсивністю накопичення Zn у надземній масі сільфію пронизанолистого типи ґрунтів розташовуються в такій послідовності: дерново-підзолистий піщаний > сірий лісовий > чорнозем типовий.

Для оцінки ступеня наближення фактичного вмісту цинку в надземній вегетативній масі сільфію пронизанолистого до нормативного обмеження розраховано коефіцієнт небезпеки Zn. На рисунку 6 наведено узагальнені значення Кн для трьох типів ґрунтів.

Так, найвищий середній коефіцієнт небезпеки встановлено на дерново-підзолистому піщаному ґрунті, що відповідає близько 15% від ДР. На сірому лісовому ґрунті показник становив 13% від ДР, тоді як найнижче значення зафіксовано на чорноземі типовому 10% від ДР. Отже, типи ґрунтів за величиною Кн розташовуються в такій послідовності: дерново-підзолистий піщаний > сірий лісовий > чорнозем типовий.

Динаміка за роками показала, що у 2023–2024 рр. значення Кн були відносно стабільними або дещо знижувалися, зокрема, для сірого лісового – 0,13 → 0,12, для чорнозему типового – 0,11 → 0,10, для дерново-підзолистого піщаного – 0,15 → 0,13. У 2025 р. відмічено підвищення Кн у всіх групах, найбільш виразне на дерново-підзолистому піщаному ґрунті до 0,19, тоді як на сірому лісовому показник зріс до 0,14, а на чорноземі типовому залишався низьким (близько 0,11).

Загалом упродовж 2023–2025 рр. Кн у всіх типах ґрунтів залишався суттєво меншим за 1, що свідчить про відсутність наближення вмісту Zn у надземній масі сільфію пронизанолистого до допустимого рівня; водночас 2025 рік характеризувався найбільшим зростанням показника, особливо на дерново-підзолистому піщаному ґрунті.

**Висновки.** На основі проведених досліджень у 2023–2025 рр. встановлено, що вміст цинку (Zn) у надземній вегетативній масі досліджених бага-

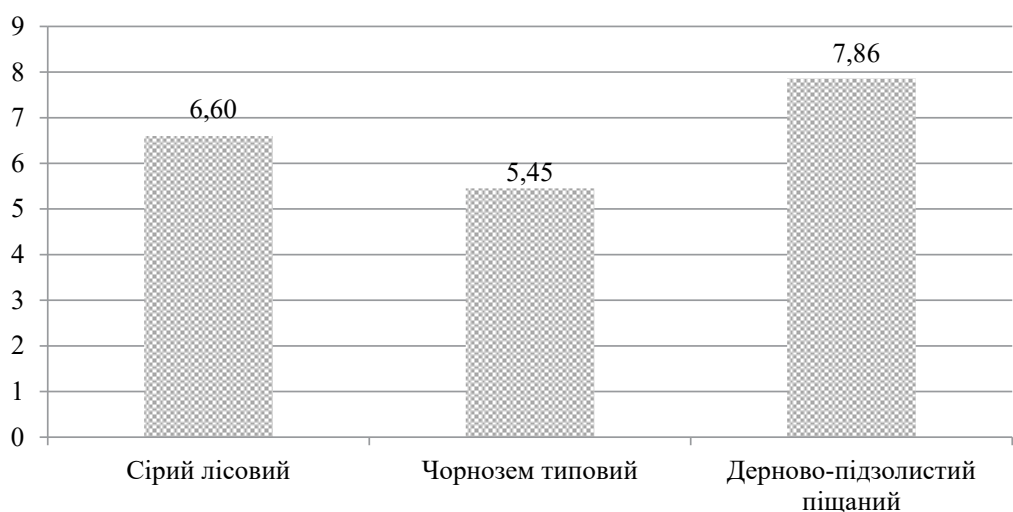


Рис. 5. Вміст Zn у надземній вегетативній масі сільфію пронизанолістого в середньому за 2023-2025 рр., мг/кг



Рис. 6. Коефіцієнт небезпеки Zn у надземній вегетативній масі сільфію пронизанолістого

торічних культур (міскантусу, мальви пенсільванської та сільфію пронизанолістого) суттєво залежить від типу ґрунту та року вегетації. Упродовж усього періоду спостережень не зафіксовано перевищення допустимого рівня, зокрема, фактичні концентрації Zn становили лише 10-33% від ДР, а коефіцієнт небезпеки (Кн) у всіх варіантах залишався істотно меншим за 1, що свідчить про нормативну безпечність отриманої надземної біомаси за показником Zn.

Виявлено чітку міжрічну закономірність: у 2023 р. значення були відносно нижчими, тоді як у 2024 р. зафіксовано різке підвищення вмісту Zn (і відповідних значень Кн), а у 2025 р. спостерігали різноспрямовані зміни залежно від культури та типу ґрунту (для міскантусу – зниження порівняно з 2024 р. із збереженням підвищених значень на сірому лісовому ґрунті). Порівняння між ґрунтовими групами підтвердило видоспецифічність накопичення. Так, для міскантусу найвищі середні значення Zn були

характерні для сірого лісового ґрунту (за узагальненням 2023–2025 рр.), тоді як для мальви пенсільванської та сільфію пронизанолістого максимальні рівні частіше спостерігали на дерново-підзолистому піщаному ґрунті, а мінімальні – на чорноземі типовому. Таким чином, результати підкреслюють доцільність урахування ґрунтових умов і міжрічних коливань під час оцінювання елементного складу біомаси багаторічних енергетичних культур та підтверджують низький ризик наближення вмісту Zn до нормативного обмеження за умов досліджу.

**Перспективи використання результатів дослідження.** Отримані результати мають вагоме наукове й практичне значення, адже показують, як змінюється вміст Zn у надземній масі міскантусу, мальви пенсільванської та сільфію пронизанолістого залежно від типу ґрунту та за роками вирощування. Це дає змогу не лише узагальнити реальний рівень накопичення Zn у біомасі, а й чітко порівняти культури та ґрунтові групи між собою.

Практична цінність роботи полягає в тому, що отримані дані можна використовувати для контролю якості біомаси та її безпечності за показником Zn під час вирощування багаторічних культур на різних ґрунтах. Результати можна використовувати для вибору ділянок під закладання нових плантацій. Дослідження також може стати основою для удосконалення екологічного та агрохімічного моніторингу, адже аналіз вмісту Zn

у рослинній масі у поєднанні з аналізом ґрунтових показників (рН, органічна речовина, рухомі форми Zn) допоможе точніше пояснювати причини коливань і прогнозувати їх. Перспективним напрямом є розширення аналізу на інші елементи та показники якості біомаси (зольність, мінеральний склад), що підвищить обґрунтованість рекомендацій для сталого використання ґрунтів і виробництва біомаси.

### Література

1. Ткачук О.П., Разанова А.М. Порівняльна оцінка накопичення Zn розторопшею плямистою (*Silybum marianum*) залежно від виду мінеральних добрив. *Агроекологічний журнал*. 2020. № 1. С. 98-103. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2020.201278>.
2. Снітинський В.В., Ткачук О.П., Разанова А.М., Коруняк О.П. Ефективність фітореMediaції забрудненого важкими металами ґрунту за вирощування розторопші плямистої. *Сільське господарство та лісівництво*. 2023. № 1. С. 164-171. DOI: [10.37128/2707-5826-2023-1-11](https://doi.org/10.37128/2707-5826-2023-1-11).
3. Чумбей В.В., Заїка В.К., Шеленко Д.І., Дмитрик П.М., Гусак В.В., Турак О.Ю. Агробіологічний та енергетичний потенціал багаторічних енергетичних культур на малородючих ґрунтах. *Таврійський науковий вісник. Сільськогосподарські науки*. 2025. Вип. 144. С. 229-236. DOI: <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.144.29>.
4. Харитонов М.М., Мартинова Н.В., Бабенко М.Г., Клімкіна І.І. Оцінка виносу макро- та мікроелементів надземною масою міскантусу, вирощеного на техноземах. *Екологічні науки*. 2025. № 1(58). С. 117-122. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.1-58.20>.
5. Razanov S., Husak O., Polishchuk M., Bakhmat O., Koruniak O., Symochko L., Ovcharuk I. Accumulation peculiarities of heavy metals in cereal crops grains of different vegetation period in conditions of the Forest Steppe of the Right Bank of Ukraine. *International Journal of Ecosystems and Ecology Science (IJEES)*. 2022. Vol. 12 (3). 43-50. DOI: <https://doi.org/10.31407/ijeess12.306>.
6. Токарчук Д. Огляд біоенергетичного потенціалу енергетичних культур для виробництва різних видів біопалив. *Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки*. 2024. № 6. С. 559-566. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2024-336-83>.
7. Гусак О.Б. Вплив мінерального удобрення ґрунтів на інтенсивність накопичення свинцю, цинку та міді у зерні озимих злаків в умовах Лісостепу Правобережного. *Таврійський науковий вісник. Сільськогосподарські науки*. 2024. Вип. 136(1). С. 70-76. DOI: <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.136.1.10>.
8. Харитонов М.М., Лемішко С.М., Бабенко М.Г. Післядія ґрунтових домішок на врожайність та якість біомаси міскантусу та прутноподібного проса, вирощених на техноземі в Степу України. *Екологічні науки*. 2025. № 2(59). С. 123-128. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.2-59.18>.
9. Razanov S., Husak O., Hnativ P., Dydiv A., Bakhmat O., Stepanchenko V., Pryshchepa A., Shcherbachuk V., Mazurak O. The Influence of the Gray Forest Soil Moisture Level on the Accumulation of Pb, Cd, Zn, Cu in Spring Barley Grain. *Journal of Ecological Engineering*. 2023. 24(7). 285-292. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/164747>.
10. Разанов С., Алексєєв О., Дидів А., Бахмат О., Разанова А. Інтенсивність накопичення важких металів і мікроелементів у вегетативній масі бавовнику, вирощеного на сірих лісових ґрунтах Правобережного Лісостепу. *Вісник Львівського національного екологічного університету. Серія «Агрономія»*. 2025. № 29. С. 9-14. DOI: <https://doi.org/10.31734/agronomy2025.29.009>.
11. Razanov S., Aliksieiev O., Bakhmat O., Bakhmat M., Lytvyn O., Aliksieieva O., Vradii O., Mazur K., Razanova A., Mazurak I. Accumulation of Chemical Elements in the Vegetative Mass of Energy Cultures Grown on Gray Forest Soils in the Western Forest Steppe of Ukraine. *Journal of Ecological Engineering*. 2024. 25(9). 282-291. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/191439>.
12. Dydiv A., Piddubna A., Gucol G., Vradii O., Zhylishchych Y., Titarenko O., Razanova A., Odnosum H., Postoienko D., Kerek S. Accumulation of Lead and Cadmium by Vegetables at Different Levels of Gray Forest Soil Moistening in the Conditions of the Right Bank Forest Steppe of Ukraine. *Journal of Ecological Engineering*. 2023. 24(10). 198-204. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/170291>.

Дата першого надходження статті до видання: 27.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026

# ЕКОЛОГІЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ

УДК 911.9:622.2:502/504

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.1-64.4>

## АНАЛІЗ ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ У РАЙОНІ РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОГЕННОГО РОДОВИЩА КОРИСНИХ КОПАЛИН «НОВОВОЛИНСЬКЕ ТЕХНОГЕННЕ»

Іванов Є.А.<sup>1</sup>, Андрейчук Ю.М.<sup>1</sup>, Ваньо Н.О.<sup>1</sup>, Войтків П.С.<sup>1</sup>, Книш І.Б.<sup>1</sup>, Нікішкін К.П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Львівський національний університет імені Івана Франка  
вул. Університетська, 1, 79000, м. Львів

<sup>2</sup>ТОВ «Екоенергоресурси»

вул. Городоцька, 85/143, 79016, м. Львів

yevhen.ivanov@lnu.edu.ua, yuriy.andreychuk@lnu.edu.ua, nazar.vano@lnu.edu.ua,  
petro.voytkiv@lnu.edu.ua, ivan.knysh@lnu.edu.ua, rawterrikon@gmail.com

Родовище корисних копалин «Нововолинське техногенне» є мінерально-сировинним об'єктом, який сформований породними відвалами із відходами вугледобування. Відвали складені відкладами аргілітів горілих і вуглевмісних негорілих, що придатні і для отримання вторинного палива, і для виробництва цегли, цементу та іншої будівельної продукції.

Серед забруднюючих речовин найбільші обсяги припадають на виділення пилу та різних твердих суспендованих частинок – 29,570 т/рік, значно менше – на викиди оксидів вуглецю (3,750 т/рік), діоксину азоту (1,194), інші леткі органічні сполуки (1,128), діоксиду сірки (0,752) і сажі (0,577). Водночас в атмосферне повітря потраплятимуть такі парникові гази як діоксид вуглецю (130,227 т/рік), метан (0,091) та оксид азоту (0,005). Найбільшу частку (94,24 % від загального об'єму викидів) має діоксид вуглецю, що утворюється під час роботи транспорту з двигунами внутрішнього згорання. Розроблення корисних копалин не впливатиме на мікроклімат місцевості. Джерелами шумового і вібраційного забруднення атмосферного повітря виступає кар'єрна техніка із коливаннями у діапазоні 42,5–50,5 дБ. Зона впливу кар'єрної техніки на населення становить 5–25 м.

Понаднормові сумарні концентрації приземних викидів в атмосферне повітря у санітарно-захисній зоні родовища відсутні. Максимальні концентрації забруднюючих речовин (пилу, сажі, оксидів азоту, діоксиду сірки тощо) не перевищують 0,94 ГДК. Площі зачепленої селітебної території смт Благодатне становлять 85,9 га, с. Грибовиця – 37,3 га. Чисельність населення, що зазнають впливу розроблення родовища складатиме близько 1 620 осіб.

Для скорочення викидів при транспортуванні корисних копалин необхідно здійснювати регулярний полив автодоріг, під'їздів до місць навантаження автосамоскидів. Очікувана ефективність цих заходів становить 60 %. *Ключові слова:* техногенне родовище, шахта, відвал, атмосферне повітря, забруднення, санітарно-захисна зона.

**Analysis of atmospheric air quality in extraction of the technogenic (man-made) mineral deposit «Novovolynske technogenic».**  
Ivanov Ye., Andreychuk Yu., Vanyo N., Voitkiv P., Knysh I., Nikishkin K.

The technogenic (man-made) mineral deposit «Novovolynske technogenic» is a mineral resource object formed by waste dumps with coal mining waste. The dumps are composed of deposits of burnt and unburnt carbonaceous mudstones, which are suitable for obtaining secondary fuel and to produce bricks, cement and other construction products.

Among pollutants, the largest volumes are accounted for by the release of dust and various solid suspended particles – 29.570 t/year, significantly less – by emissions of carbon oxides (3.750 t/year), nitrogen dioxin (1.194), other volatile organic compounds (1.128), sulfur dioxide (0.752) and soot (0.577). At the same time, greenhouse gases such as carbon dioxide (130.227 t/year), methane (0.091) and nitrogen oxide (0.005) will enter the atmospheric air. The largest share (94.24% of the total volume of emissions) is carbon dioxide, which is formed during the operation of transport with internal combustion engines. Mining will not affect the microclimate of the area. Sources of noise and vibration pollution of the atmospheric air are quarry equipment with vibrations in the range of 42.5–50.5 dB. The zone of impact of quarry equipment on the population is 5–25 m.

There are no excess total concentrations of surface emissions into the atmospheric air in the sanitary protection zone of the deposit. The maximum concentrations of pollutants (dust, soot, nitrogen oxides, sulfur dioxide, etc.) do not exceed 0.94 MPC. The areas of the affected residential area of the Blagodadne are 85.9 ha, the Hrybovtyisia is 37.3 ha. The population affected by the development of the deposit will be about 1,620 people.

To reduce emissions during the transportation of minerals, it is necessary to regularly water roads and approaches to dump truck loading areas. The expected effectiveness of these measures is 60%. *Key words:* technogenic deposit, mine, dump, atmospheric air, pollution, sanitary protection zone.



© Іванов Є.А., Андрейчук Ю.М., Ваньо Н.О., Войтків П.С., Книш І.Б., Нікішкін К.П., 2026  
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

**Постановка проблеми.** Родовище «Нововолинське техногенне», розміщене на площах відвалу ліквідованої вугільної шахти № 6 «Нововолинська», що розташована в межах Волинської області, у 0,6 км на північний захід від селища Благодатне та у 12 км на південний схід від м. Нововолинська [1]. Родовище є техногенним мінерально-сировинним об'єктом, який сформований породними відвалами із відходами вугледобування. В його межах розроблятимуть відклади аргілітів горілих і вуглевмісних негорілих, що придатні як для отримання вторинного палива, так й для використання в енерго-технологічних процесах виробництва цегли, цементу та іншої будівельної продукції.

**Актуальність дослідження.** Для удосконалення технологій ефективного розроблення техногенного родовища необхідно проаналізувати стан якості атмосферного повітря в межах його санітарно-захисної зони. Головною метою є визначення потенційних зон загрозливого впливу забруднюючих речовин на здоров'я мешканців району дослідження.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Авторами накопичено власний досвід вивчення пост-майнінгових геосистем, що формуються в межах відвалів вугільних шахт Нововолинського ГПР, зокрема досліджуваного відвалу [1–5]. Визначальним документом для аналізу стану атмосферного повітря є робочий проєкт розроблення та рекультивативної ділянки «Нововолинська техногенна» [6]. У роботі використано звіти геолого-економічної оцінки запасів кам'яного вугілля із геологічним довивченням [7] та оцінювання впливу на довкілля видобування корисних копалин [8].

**Об'єкти і методи дослідження.** Головним критерієм визначення гранично-допустимих викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря виступають розрахункові концентрації на межі нормативної чи фактичної відповідності санітарно-захисної зони гігієнічним нормативам. Оцінювання впливу викидів забруднюючих речовин на стан забруднення атмосферного повітря здійснено на межі санітарно-захисної зони у 300,0 м від найближчої житлової та дачної забудови. Точки вимірювання відображено на рисунку 1.

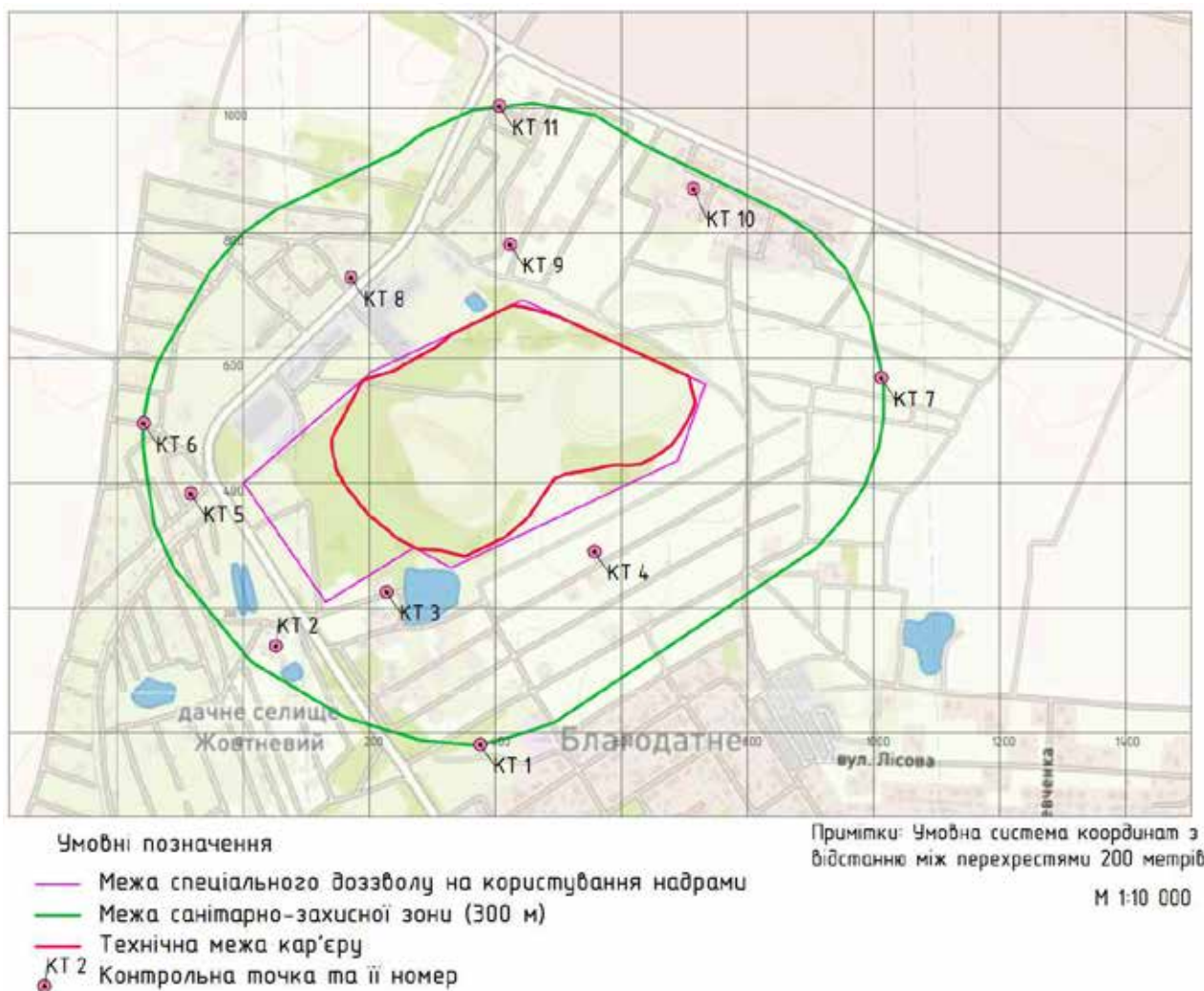


Рис. 1. Розташування точок вимірювання в межах санітарно-захисної зони техногенного родовища «Нововолинське техногенне»

**Якість атмосферного повітря у районі дослідження.** Промислові території у районі Нововолинська і Благодатного, ще на початку 2000-х років зазнавали значного антропогенного навантаження від пересувних та стаціонарних джерел на атмосферне повітря у зв'язку із видобуванням покладів кам'яного вугілля. Це призводило до погіршення якості складових природного середовища та фіксації перевищення концентрацій забруднюючих речовин в атмосфері.

Оцінювання стану атмосферного повітря здійснює Комплексна лабораторія Волинського обласного центру з гідрометеорології. Програма моніторингу якості атмосферного повітря передбачає вимірювання восьми забруднюючих речовин: пилу, оксиду азоту, діоксиду азоту, діоксиду сірки, оксиду вуглецю, фенолу, формальдегіду та розчинених сульфатів, а також показників гамма-фону.

Моніторинг атмосферного повітря у Нововолинській територіальній громаді здійснюють на двох автоматичних метеостанціях, що розташовані у різних мікрорайонах Нововолинська – у 7,3 і 9,0 км відповідно від техногенного родовища корисних копалин. Рівень забруднення атмосферного повітря у місті відносять до доброго рівня з індексом якості повітря, що коливається від 6 до 50 та помірного – з індексом у 51–100, періодично індекс перевищує 100–116 і відповідає рівню небезпечного для чутливих людей [9]. Середній індекс якості атмосферного повітря наведено на рис. 2. Фонові концентрації забруднюючих речовин в повітрі у зоні розроблення техногенного родовища подано у табл. 1.

**Вплив розроблення супутніх корисних копалин на стан атмосферного повітря.** Головними джерелами забруднення атмосферного повітря під час розроблення у техногенному родовищі супутніх корисних копалин є викиди пилу у процесі проведення гірничих виймальних і навантажувальних робіт, транспортування, утворення тимчасових відвалів (насіпів), виготовлення готової мінерально-сировинної продукції та гірничотехнічної і біологічної рекультивациі. Всі джерела є неорганізованими та проявляються лише в межах території планованої діяльності та її санітарно-захисної зони.

До викидів забруднюючих речовин, що надходять в атмосферного повітря під час роботи кар'єрної техніки та автомобільного обладнання відносимо оксид вуглецю, оксиди азоту, вуглеводні, діоксид сірки, сажа та бенз(а)пірен. До викидів забруднюючих речовин, що утворюються в межах промислового майданчику під час заправлення техніки і роботи пересувного зварювального посту належать залізо та його сполуки (у перерахунку на залізо), манган та його сполуки (у перерахунку на манган), хром та його сполуки (у перерахунку на триоксид хрому) та фтор та його паро- й газоподібні сполуки (у перерахунку на фтористий водень). При роботі дизель-генераторної установки як резервного джерела електропостачання в атмосферне повітря надходять оксид вуглецю, оксиди азоту, вуглеводні, діоксид сірки, сажа, формальдегід і бенз(а)пірен.

Загалом, під час здійснення планованої діяльності в межах техногенного родовища в атмосферне повітря потраплятимуть оксиди азоту, оксид вуг-

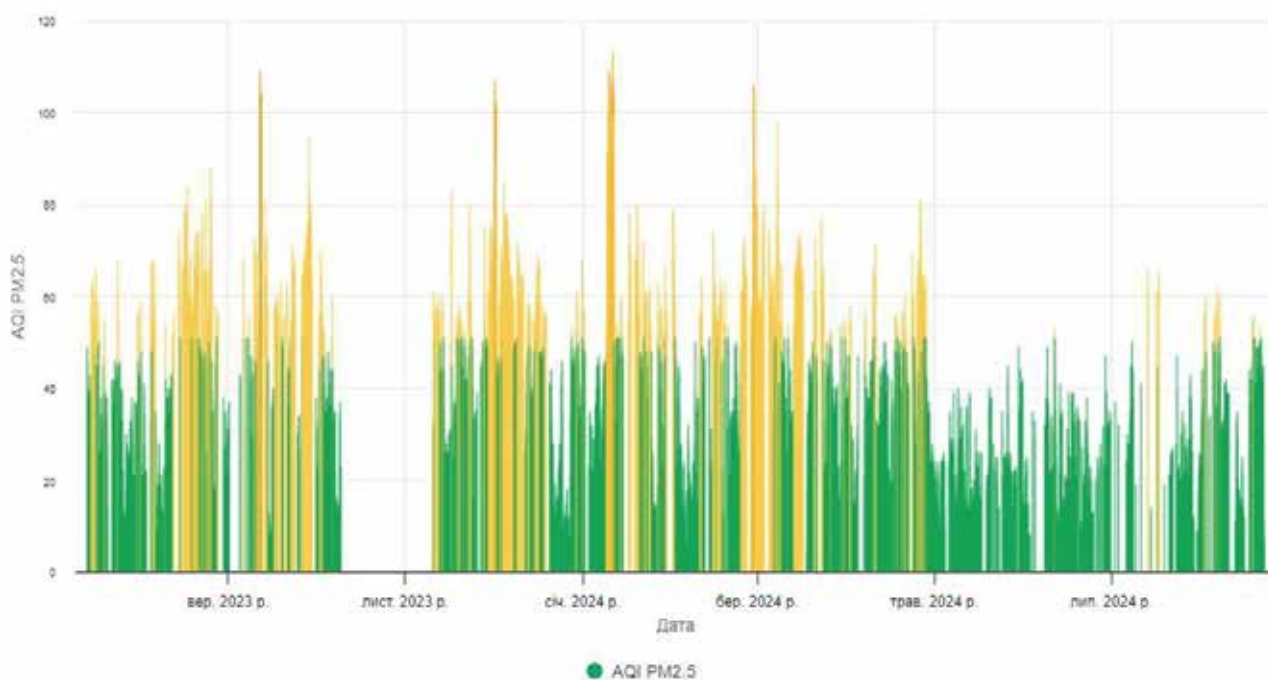


Рис. 2. Середній індекс якості атмосферного повітря у м. Нововолинськ (за період з 14 липня 2023 р. до 22 серпня 2024 р.) [на основі 9]

Таблиця 1

## Фонові концентрації забруднення атмосферного повітря у районі дослідження

№ з/п	Найменування речовини	ГДК, мг/м <sup>3</sup>	Фонова концентрація	
			мг/м <sup>3</sup>	Частки ГДК
1	Пил, тверді суспендовані частинки	0,5	0,12	0,24
2	Сірки діоксид	0,5	0,2	0,4
3	Вуглецю оксид	5	2,0	0,4
4	Азоту діоксид	0,2	0,08	0,4
5	Сажа	0,15	0,06	0,4
6	Неметанові леткі органічні сполуки	1	0,4	0,4
7	Залізо та його сполуки	0,4	0,16	0,4
8	Хром та його сполуки	0,01	0,004	0,4
9	Манган та його сполуки	0,01	0,004	0,4
10	Формальдегід	0,035	0,014	0,4

Таблиця 2

## Сумарна кількість викидів забруднюючих речовин, які викидаються в атмосферне повітря та їхні основні характеристики [на основі 8]

№ з/п	Найменування речовини	ГДК м.р., мг/м <sup>3</sup>	Клас небезпеки	Потужність викидів у процесі, т/рік	
				розроблення родовища	рекультиви-вації родовища
1	Пил, тверді суспендовані частинки	0,5	3	20,9	1,27
2	Азоту діоксид	0,2	3	0,97	0,224
3	Вуглецю оксид	5,0	4	3,19	0,56
4	Сірки діоксид	0,5	3	0,64	0,112
5	Сажа	0,15	3	0,49	0,087
6	Неметанові леткі органічні сполуки	1,0	4	0,96	0,168
7	Бенз(а)пірен (мкг/100 м <sup>3</sup> )	0,0001	1	1,3E <sup>-5</sup>	1,6E <sup>-6</sup>
8	Залізо та його сполуки	0,4	3	0,00142	–
9	Хром та його сполуки	0,015	1	0,00004	–
10	Манган та його сполуки	0,01	2	0,0001	–
11	Фтор, фтористий водень	0,02	2	0,00009	–
12	Формальдегід	0,035	2	0,0009	–
	<i>Всього</i>			<i>27,15</i>	<i>2,42</i>
	<i>Парникові гази, у тім числі:</i>			<i>112,7</i>	<i>17,6</i>
13	Метан			0,009	0,0014
14	Азоту оксид			0,004	0,0007
15	Вуглецю діоксид			112,654	17,573

лецю, речовини у вигляді пилу (твердих суспендованих часток, що недиференційовані за складом), вуглеводні, сажа, формальдегід, бенз(а)пірен, залізо, манган, хром та їхні сполуки, фтор та його парой газоподібні сполуки у перерахунку на фтористий водень та парникові гази (оксид діазоту, метан, діоксид вуглецю). Сумарна кількість викидів забруднюючих речовин у атмосферне повітря на етапах розроблення покладів техногенного родовища та його рекультивації та їхні характеристики наведені в таблиці 2.

Серед забруднюючих речовин найбільші обсяги припадають на виділення пилу та різних твердих суспендованих частинок – 29,570 т/рік, значно менше – на викиди оксиду вуглецю (3,750 т/рік), діоксину азоту (1,194), інші леткі органічні сполуки (1,128), діоксиду сірки (0,752) і сажі (0,577). Водночас в атмосферне повітря потраплятимуть такі парникові гази як діоксид вуглецю (130,227 т/рік), метан (0,091) та оксид азоту (0,005) [8].

Аналіз отриманих результатів розрахунків по розсіюванні забруднюючих речовин в приземному

шарі атмосфери показав, що максимальні приземні концентрації для всіх забруднюючих речовин з урахуванням величини фонових концентрацій на межі санітарно-захисної зони та найближчої житлової забудови не перевищують ГДК.

За очікуваним об'ємом викидів у атмосферне повітря за рік найбільшу частку (94,24 % від загального об'єму викидів) має діоксид вуглецю, що утворюється під час роботи транспорту з двигунами внутрішнього згоряння. Ця речовина є найпоширенішим парниковим газом у світі. Загалом, підприємство викидатиме в атмосферу 112,7 т/рік діоксиду вуглецю. Змін кліматичних умов у процесі розроблення техногенного родовища не очікується, оскільки кількісні показники викидів парникових газів не зазнають істотних змін від існуючої ситуації. Особливості кліматичних умов, які сприяють зростанню інтенсивності впливів планованої діяльності на природне середовище відсутні. Також відсутні значні виділення теплоти, інертних газів і вологи. Розроблення будівельних корисних копалин не впливатиме на мікроклімат місцевості оскільки висота терикону на сьогодні складає до 35 м, а після відпрацювання родовища його поверхня буде на рівні оточуючої місцевості і не зможе впливати на вітрові потоки повітря чи впливати на формування хмар і туманів.

Масштаб впливу на атмосферне повітря слід оцінювати за зоною впливу розроблення техногенного родовища на стан атмосферного повітря за головними забруднюючими речовинами (пил, оксиди азоту, діоксид сірки, оксид вуглецю, сажа) з урахуванням фонових концентрацій. Приземні концентрації оксиду вуглецю, діоксиду сірки та сажі навколо джерел викидів є нижчими 0,25 ГДК і безпечними. Понаднормативні концентрації пилу (понад 1,0 ГДК) визначено лише навколо джерел викидів у радіусі до 110 м. При цьому максимальні приземні концентрації сягають 1,52 ГДК. В межі територій із приземними концентраціями 0,25–1,0 ГДК не потрапляють природоохоронні території, зони відпочинку та об'єкти культурної спадщини [8].

Для скорочення викидів при транспортуванні корисних копалин буде здійснюватися регулярний полив автодоріг, під'їздів до місць навантаження автосамоскидів. Очікувана ефективність цих заходів становить 60 %. При відвалоутворенні планується проводити зволоження поверхні пилозв'язуючим розчином, що забезпечує пилоподавлення при вітровій ерозії на 85–90 %. Перед навантаженням у бункер дробильно-сортувальної установки та просіювальної машини гірнична маса зрошується, дробарки і грохоти також оснащені системами зрошення, тому після дроблення і просіювання зволожена гірнична маса рухається по транспортерам. Для скорочення викидів при виймально-навантажувальних роботах здійснюватимуть зрошення забоїв із ефективністю у 75 % [6].

Санітарна захисна зона (СЗЗ) підприємства становить 300 м. На основі Основними джерелами шумового і вібраційного забруднення атмосферного повітря є кар'єрна техніка. У кар'єрі визначено дев'ять джерел шуму. Найвищі значення акустичного навантаження мають екскаватор і гідромолот (99 дБА), просіювальна машина (92), автосамоскиди (87) та дробильно-сортувальна установка (85). Результати розрахунків шумового забруднення на межі СЗЗ становить 43,0–45,4 дБА. В межах дачної забудови, що розміщена у санітарно захисній зоні рівень шуму сягатиме 50,3–53,0 дБА [8]. Загалом, розрахунковий рівень шуму не перевищує допустимі норми як в нічний, так і денний період.

Кар'єрна техніка створює коливання з рівнем віброприскорення у діапазоні 42,5–50,5 дБV. Вплив на населення непостійної вібрації від добувних робіт у денний час оцінюється у 40 дБV. Зона впливу кар'єрної техніки на населення становить 5–25 м. Таким чином, санітарні норми для населення виконані вже безпосередньо на межі виробничого майданчику.

При експлуатації кар'єрних машин й автотранспорту у процесі розроблення корисних копалин та виконання рекультивційних робіт утворюватимуться такі відходи: відходи видобування, змішані побутові відходи, фільтрувальні матеріали, абсорбенти, свинцеві відходи, синтетичні і моторні мастила, трансмісійні і мастильні оливи, зношені шини тощо.

**Викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря.** Оцінка впливу викидів забруднюючих речовин на стан забруднення атмосферного повітря здійснюється на основі розрахунків їхнього розсіювання в атмосфері на межі санітарно-захисної зони (300 м) і найближчої житлової та дачної забудови. Для оцінювання впливу розроблення корисних копалин на повітряне середовище виконуються розрахунки розсіювання забруднюючих речовин в атмосферному повітрі з урахуванням фонових концентрацій. Розраховують лише ті викиди забруднюючих речовин, що відповідають таким умовам [8]:

$$\frac{M_{\text{м.р.}}}{\text{ГДК}_{\text{м.р.}}} > \Phi,$$

де  $\Phi = 0,1$  при  $H \leq 10$  м – коефіцієнт доцільності розрахунку;  $M_{\text{м.р.}}$  – сумарна кількість викидів  $i$ -ої забруднюючої речовини, г/с;  $\text{ГДК}_{\text{м.р.}}$  – максимальна разова ГДК, мг/м<sup>3</sup>. Результати розрахунків розсіювання викидів від підготовчих робіт та розроблення покладів техногенного родовища наведені в таблиці 3.

Результати визначення доцільності проведення розрахунків розсіювання відходів під час реалізації робіт із рекультивції техногенного родовища вирізняються нижчими показниками. Існує доцільність розрахунків для пилу і твердих суспендованих частинок, сажі та діоксиду азоту.

**Доцільність проведення розрахунків розсіювання викидів  
від розроблення покладів техногенного родовища**

№ з/п	Найменування речовини	ГДК м.р., мг/м <sup>3</sup>	Викиди М м.р., г/с	<u>М м.р.</u> ГДК м.р.	Доцільність розрахунку
1	Азоту діоксид	0,2	0,203	1,1	доцільно
2	Сажа	0,15	0,08	0,5	доцільно
3	Сірки діоксид	0,5	0,1	0,2	доцільно
4	Вуглецю оксид	5,0	0,506	0,1	доцільно
5	Бенз(а)пірен (мкг/100 м <sup>3</sup> )	0,0001	0,0000028	0,03	недоцільно
6	Неметанові леткі органічні сполуки	1,0	0,15	0,15	доцільно
7	Пил, тверді суспендовані частинки	0,5	24,07	48	доцільно
8	Залізо та його сполуки	0,4	0,0026	0,006	недоцільно
9	Хром та його сполуки	0,015	0,00011	0,007	недоцільно
10	Манган та його сполуки	0,01	0,00016	0,016	недоцільно
11	Фтор, фтористий водень	0,02	0,00026	0,013	недоцільно
12	Формальдегід	0,035	0,0002	0,006	недоцільно

Критерієм для визначення гранично-допустимих викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря є відповідність їх розрахункових концентрацій на межі санітарно-захисної зони гігієнічним нормативам. Оцінювання впливу викидів забруднюючих речовин на стан забруднення атмосферного повітря здійснюється за даними результатів розрахунків розсіювання забруднюючих речовин в атмосферному повітрі на межі санітарно-захисної зони, що становить 300,0 м, а також найближчої житлової та дачної забудови.

Просторове поширення впливу на атмосферне повітря оцінюємо за зоною розроблення покладів техногенного родовища на якість атмосферного повітря за головними забруднюючими речовинами (пил, сажа, оксиди азоту, діоксид сірки, оксид вуглецю) з врахуванням їхніх фонових концентрацій. Приземні концентрації оксиду вуглецю, діоксиду сірки та сажі навколо джерел викидів нижче 0,25 ГДК, тому їх не розглядаємо.

Понаднормові приземні концентрації пилу (понад 1,0 ГДК) визначені у межах території розроблення покладів техногенного родовища навколо джерел викидів. Максимальні розрахункові приземні концентрації пилу та інших твердих суспендованих частинок становлять 1,52 ГДК, а радіус зони впливу з понаднормативними концентраціями становить 110 м. В межі території де приземні концентрації від 0,25 до 1,0 ГДК не потрапляють зони відпочинку, природоохоронні території та об'єкти культурної спадщини. Орієнтовна площа селітебної території селища Благодатне становить близько 39,8 га, с. Грибовиця (вздовж автошляху) – 12,9 га (рис. 3). Чисельність населення, що зазнають впливу пилових мас становитиме близько 760 осіб.

Перевищення вмісту оксидів азоту визначено у районі дослідження. Варто водночас відзначити, що навколо промислових джерел викидів перевищення не спостерігатимуть, а максимальні разові приземні концентрації оксиду азоту не перевищують 0,72 ГДК. Орієнтовна площа селітебної території селища Благодатне із підвищеним вмістом оксидів азоту становить 3,0 га (рис. 4). Чисельність населення, що зазнають впливу не перевищує 50 осіб.

Понаднормові сумарні концентрації приземних викидів в атмосферне повітря підсумовані в межах території розроблення техногенного родовища навколо джерел забруднення відсутні. Максимальні приземні концентрації забруднюючих речовин становлять 0,94 ГДК. До територій із приземними концентраціями забруднення атмосферного повітря від 0,25 до 1,0 ГДК не потрапляють природоохоронні території, зони відпочинку та об'єкти культурної спадщини. Орієнтовні площі зачепленої селітебної території селища Благодатне становлять 85,9 га, с. Грибовиця – 37,3 га (рис. 5). Чисельність населення, що зазнають впливу складатиме близько 1 620 осіб.

Загалом, внесок розроблення техногенного родовища корисних копалин «Нововолинське техногенне» у забруднення атмосферного повітря за забруднюючими речовинами, такими як пил, сажа, оксиди азоту й діоксид сірки, що перевищують 25 % від встановлених нормативів якості атмосферного повітря визначено як істотний внесок у погіршення стану навколишнього природного середовища. Визначення якості атмосферного повітря у районі дослідження вимагає моніторингу із застосуванням досвіду геоecологічного картографування і моделювання гірничопромислових територій та об'єктів [10, 11]. На основі оцінювання розрахунків призем-

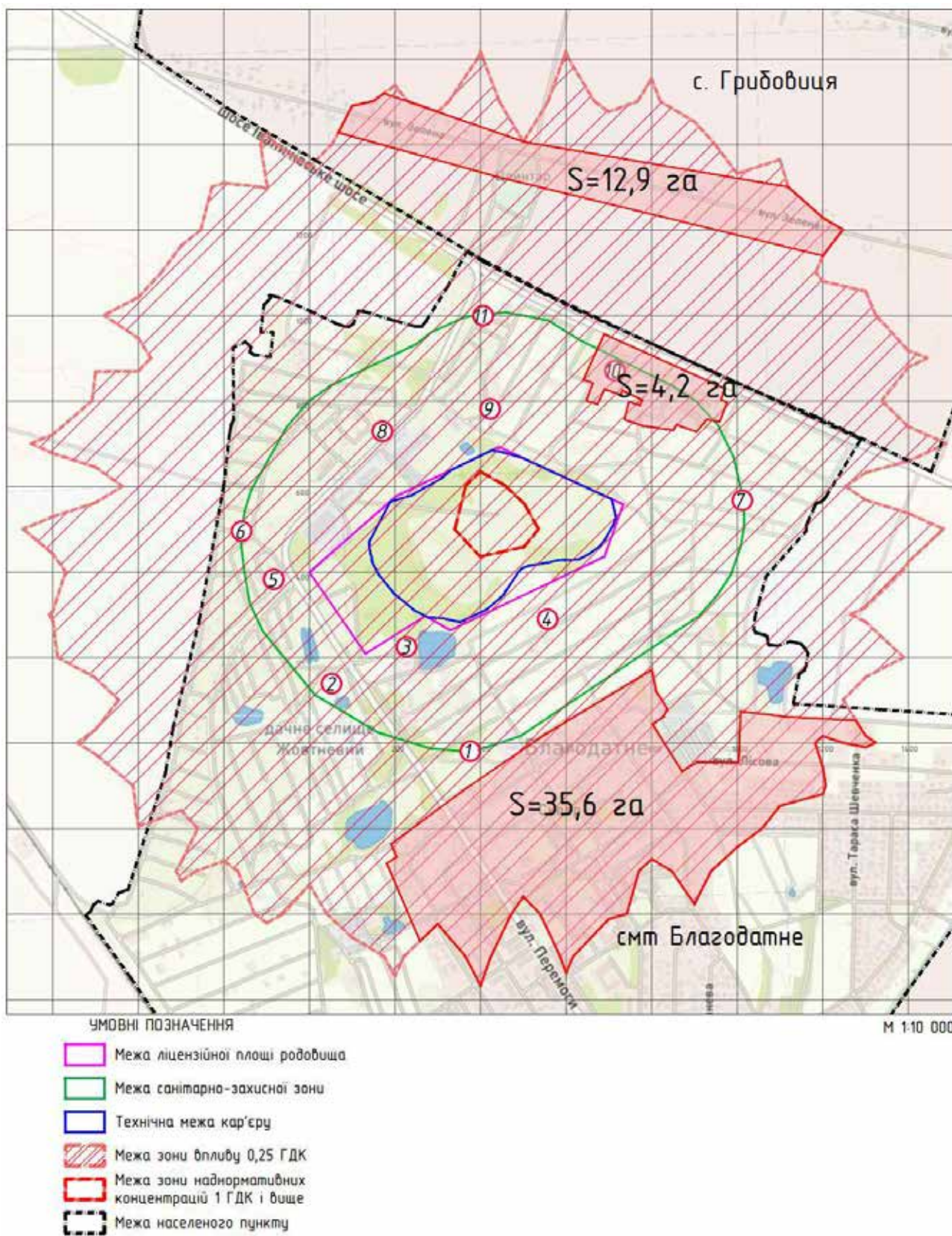


Рис. 3. Вплив пилу на якість атмосферного повітря у районі дослідження

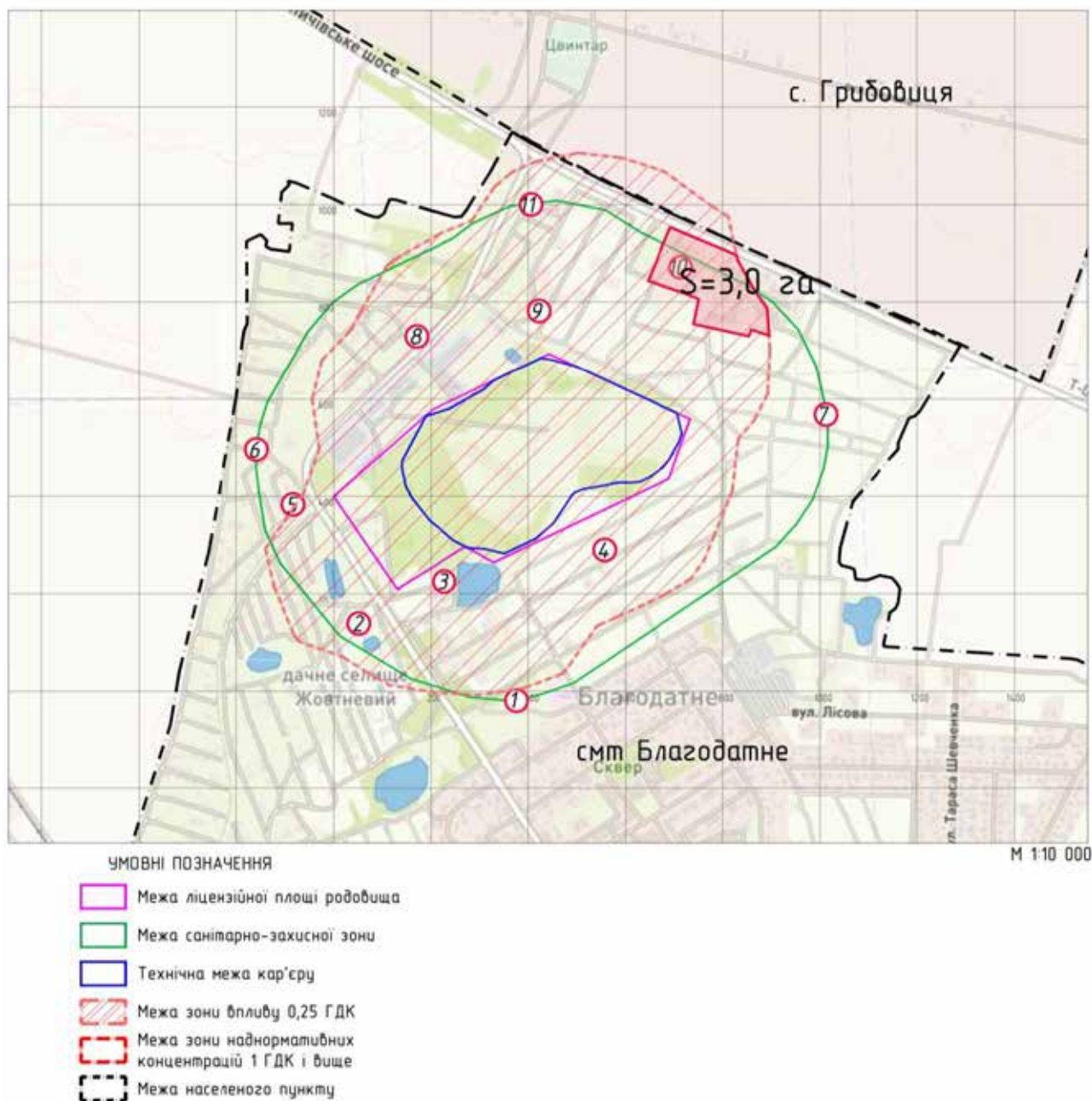


Рис. 4. Вплив оксидів азоту на якість атмосферного повітря у районі дослідження

них концентрацій різних забруднюючих речовин підтверджуємо, що вплив від впровадження планованої діяльності на селітєбну територію перебуває в межах норм та не призведе до порушення встановлених санітарно-гігієнічних нормативів. Тривалість впливу на атмосферне повітря визначена тривалістю проведення видобувних робіт на родовищі та становитиме понад 30 рік.

**Висновки.** Пропонуємо на розгляд такі головні висновки:

1. Родовище корисних копалин «Нововолинське техногенне» є мінерально-сировинним об'єктом, який сформований породними відвалами із від-

ходами вугледобування. Відвали складені відкладами аргілітів горілих і вуглевмісних негорілих, що придатні і для отримання вторинного палива, і для виробництва цегли, цементу та іншої будівельної продукції.

2. Серед забруднюючих речовин найбільші обсяги припадають на виділення пилу та різних твердих суспендованих частинок – 29,570 т/рік, значно менше – на викиди оксидів вуглецю (3,750 т/рік), діоксину азоту (1,194), інші леткі органічні сполуки (1,128), діоксиду сірки (0,752) і сажі (0,577). Водночас в атмосферне повітря потраплятимуть такі парникові гази як діоксид вуглецю (130,227 т/

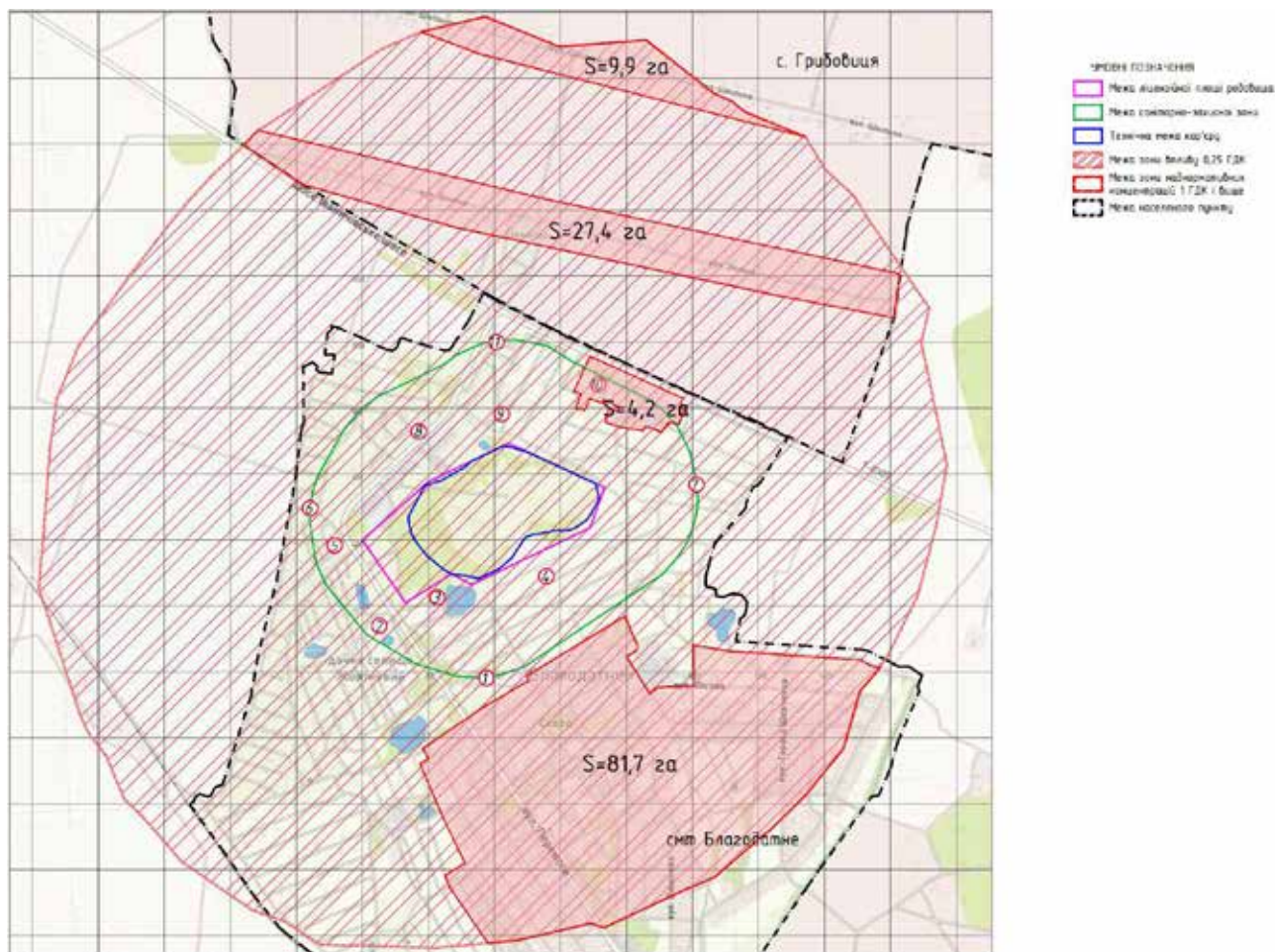


Рис. 5. Сумарний вплив забруднюючих речовин на якість атмосферного повітря у районі дослідження

рік), метан (0,091) та оксид азоту (0,005). Найбільшу частку (94,24 % від загального об'єму викидів) має діоксид вуглецю, що утворюється під час роботи транспорту з двигунами внутрішнього згорання. Розроблення корисних копалин не впливатиме на мікроклімат місцевості.

3. Джерелами шумового і вібраційного забруднення атмосферного повітря є кар'єрна техніка із коливаннями у діапазоні 42,5–50,5 дБ. Зона впливу кар'єрної техніки на населення становить 5–25 м.

4. Понаднормові сумарні концентрації приземних викидів в атмосферне повітря у санітарно-за-

хисній зоні родовища відсутні. Максимальні концентрації забруднюючих речовин (пилу, сажі, оксидів азоту, діоксиду сірки тощо) не перевищують 0,94 ГДК. Площі зачепленої селітебної території селища Благодатне становлять 85,9 га, с. Грибовиця – 37,3 га. Чисельність населення, що зазнають впливу розроблення родовища складатиме близько 1 620 осіб.

5. Для скорочення викидів при розробленні корисних копалин необхідно здійснювати регулярний полив автодоріг, під'їздів до місць навантаження автосамоскидів. Очікувана ефективність цих заходів становить 60 %.

### Література

1. Андрейчук Ю. А., Ванько Н. О., Иванов С. А., Книш І. Б., Нікішкін К. П. Техногенне родовище корисних копалин «Нововолинське техногенне»: стан, технологія розроблення та оцінка впливу на довкілля. *Екологічні науки*. 2025. № 2(59). С. 9–16.
2. Иванов С. А., Андрейчук Ю. М., Пилипович О. В. Постмайнінгові ландшафти Львівсько-Волинського кам'яновугільного басейну, їх формування і розвиток. *Ландшафтознавство*. 2024. № 6(2). С. 25–40.
3. Иванов С., Ковальчук І., Терещук О. Геоекологія Нововолинського гірничопромислового району : монографія. Луцьк : Волин. націон. ун-тет ім. Лесі Українки, 2009.
4. Ковальчук І. П., Иванов С. А., Терещук О. С. Геоекологічна ситуація в межах Нововолинського гірничопромислового району та шляхи її покращення. *Природа Західного Полісся та прилеглих територій*. 2010. № 7. С. 3–10.
5. Иванов С. А., Ковальчук І. П. Накопичення гірничопромислових відходів у Львівсько-Волинському кам'яновугільному басейні: сучасний стан, проблеми і перспективи поводження. *Український журнал природничих наук*. 2024. № 7. С. 75–84.

6. Робочий проєкт розробки та рекультивачії ділянки «Нововолинська техногенна» (відвал шахти № 6 «Нововолинська») у Володимирському районі Волинської області. Київ, 2024. 75 с. (Препринт. ТОВ «Інститут геології»).
7. Геолого-економічна оцінка кам'яного вугілля з геологічним довивченням ділянки «Нововолинська техногенна» (відвал шахти № 6 «Нововолинська») у Володимир-Волинському районі Волинської області : ТОВ «Гео-Кратон»; Відпов. виконав.: В. Парфенюк. Київ, 2024. (Препринт. ТОВ «Гео-Кратон»).
8. Звіт з оцінки впливу на довкілля видобування корисних копалин з техногенного родовища «Нововолинське техногенне» (відвал шахти № 6 «Нововолинська») : ТОВ «НВП «Укргеологостром». Київ, 2024. 512 с. (Препринт. ТОВ «НВП «Укргеологостром»).
9. Якість повітря у місті Нововолинськ. *SaveEcoBot. Єдина в Україні екологічна система*. URL: <https://www.saveecobot.com/maps/novovolynsk> (дата звернення: 12.12.2025).
10. Ковальчук І., Іванов Є., Клейник В. Картографування геоecологічного стану природно-господарських систем гірничопромислових територій. *Часопис картографії*. 2011. Вип. 2. С. 129–137.
11. Іванов Є. А., Ковальчук І. П., Андрейчук Ю. М. Теоретико-методологічні основи й методика геоecологічного картографування і моделювання гірничопромислових геокмплексів. *Науковий вісник Волинського державного університету ім. Лесі Українки. Географічні науки*. 2006. № 2. С. 15–23.

Дата першого надходження статті до видання: 29.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026

УДК 502.3:551.510.42:711.4(477.83)

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.1-64.5>

## ДИНАМІКА ЗМІНИ СТАНУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ТИЛОВОГО МІСТА (НА ПРИКЛАДІ М. ЛЬВОВА)

Мільович С.С., Галла-Бобик С.В., Ченчак М.М.

Державний вищий навчальний заклад «Ужгородський національний університет»

вул. Підгірна, 46, 88000, м. Ужгород

stepan.milyovich@uzhnu.edu.ua, sitlana.halla-bobyk@uzhnu.edu.ua,

mykhailo.chenchak@uzhnu.edu.ua

Забруднення атмосферного повітря є головною екологічною загрозою для здоров'я у цілому світі, яке не тільки призводить до підвищення рівня передчасної смертності, а і є основним фактором ризику розвитку та загострення для всіх хронічних захворювань.

Військова агресія росії проти України спричинила значне погіршення якості атмосферного повітря не лише в прифронтових регіонах та населених пунктах, що зазнають масованих ракетних і дронних атак, але й у тилових містах, зокрема і у м. Львові. Основними причинами цього є збільшення кількості населення за рахунок внутрішньо переміщених осіб і відповідно транспортного навантаження; зростання обсягів будівництва; релокація підприємств із небезпечних регіонів; перетворення міста на ключовий логістичний центр, внаслідок чого зросли обсяги вантажоперевезень та впроваджені Львівською міською радою та мешканцями заходів для забезпечення енергетичної незалежності у зв'язку з нестабільністю енергосистеми.

Проаналізовано стан забруднення атмосферного повітря на підставі офіційних звітів чотирьох стаціонарних постів спостереження у м. Львові «Характеристика забруднення атмосфери» (Форма 10) за 2021 та 2024рр.

Комплексний індекс забруднення повітря впродовж аналізованого періоду по постам спостереження зріс з 5,91-8,13 до 7,36-10,19, що пов'язано із збільшенням середньорічної концентрації формальдегіду, який відіграє ключову роль в екологічній оцінці якості повітря у м. Львові. Найвищі концентрації формальдегіду та його найбільший приріст – на 31,1% ( $p < 0,001$ ,  $r = 0,76$ ) спостерігався у центральній частині міста з щільною забудовою (пост № 3). Основним джерелом забруднення у цьому мікрорайоні та на посту № 4 є автотранспорт, про що свідчить висока кореляція по діоксиду нітрогену ( $r = 0,82-0,88$ ).

Найбільше зростання концентрації фтороводню (+35,4%,  $p < 0,001$ ) до 4,8 ГДК<sub>сд</sub> зафіксовано на посту спостереження № 4, що вказує на збільшення техногенного впливу.

У 2024р., порівняно із 2021р., вміст діоксиду сульфуру у повітрі міста зменшився на 45–58%, а вміст пилу зріс на 13-22%. Не зважаючи на загальноміську тенденцію до підвищення концентрації пилу і формальдегіду у атмосферному повітрі впродовж аналізованих років, найбільш безпечним є житловий мікрорайон з найменшим транспортним навантаженням (пост № 1).  
*Ключові слова:* м. Львів, атмосферне повітря, забруднювальні речовини, нормативні значення, індекс забруднення повітря; статистичні методи обробки даних.

**The dynamics of changes in the air quality of the rear city (on the example of Lviv). Milyovich S., Halla-Bobik S., Chenchak M.**

Air pollution is a major environmental threat to health worldwide, not only leading to increased rates of premature mortality but also being a major risk factor for the development and exacerbation of all chronic diseases.

The Russia's military invasion of Ukraine has caused a significant air quality deterioration, not only in frontline regions and settlements suffering from massive missile and drone attacks, but also in rear cities, including Lviv. The main factors contributing to this are an increase in population due to internally displaced persons and, consequently, transport load, an increase in construction output volumes, the relocation of businesses from dangerous regions, the city becoming a key logistics hub, which has led to an increase in freight volumes, and measures introduced by the Lviv City Council and residents to ensure energy independence due to the instability of the energy system.

The analysis of atmospheric pollution was carried out based on official reports 'Characteristics of atmospheric pollution' (Form 10) from four stationary observation posts in Lviv for 2021 and 2024.

The average air pollution index during the analysed period at observation posts increased from 5.91-8.13 to 7.36-10.19, which is caused by an increase in the average annual concentration of formaldehyde, which plays a decisive role in the ecological air quality assessment in Lviv. The highest concentrations of formaldehyde and its greatest increase – by 31.1% ( $p < 0.001$ ,  $r = 0.76$ ) – were observed in the central part of the city with dense development (observation post No. 3). The main source of pollution in this sub-district and at observation post No. 4 is motor vehicles, as evidenced by the high correlation for nitrogen dioxide ( $r = 0.82-0.88$ ).

The largest increase in hydrogen fluoride concentration (+35.4%,  $p < 0.001$ ) to 4.8 MPC was recorded at observation point No. 4, indicating an increase in technogenic impact.

Compared to 2021 in 2024 the sulphur dioxide content in the city's air decreased by 45–58%, while the dust content increased by 13–22%. Despite the general city-wide trend towards increased concentrations of dust and formaldehyde in the atmosphere during the years analysed, the safest residential sub-district is the one with the lowest traffic load (observation post No. 1). *Key words:* Lviv, air, pollutants, normative values, Air Quality Index, statistical methods of data processing.



**Постановка проблеми.** За даними ЮНІСЕФ, у 2021р. забруднення повітря призвело до понад 8 мільйонів летальних випадків серед дорослих і дітей [1].

Незадовільний стан атмосферного повітря спричиняє 36% смертей від раку легень, 34% – від інсультів та 27% – від серцево-судинних хвороб (ВООЗ) [2].

Військове вторгнення росії в Україну призвело до значного погіршення

стану атмосферного повітря не тільки в прифронтових регіонах та населених пунктах, які зазнають масованих ракетних та дронівих ударів, а і у тилових містах.

**Актуальність дослідження.** Актуальність дослідження обумовлена необхідністю визначення тенденцій до кількісних і просторових змін стану атмосферного повітря міста для розробки відповідних управлінських рішень.

**Зв'язок авторського доробку з науковими та практичними завданнями.** Ряд наукових статей присвячено дослідженню обсягів викидів забруднювальних речовин від стаціонарних джерел забруднення у Львівській області [3]. За станом атмосферного повітря Львів входить до переліку найбільш забруднених міст України [4-7]. За даними різних авторів, основним джерелом забруднення повітря у місті є автотранспорт [8-11].

**Новизна дослідження.** Вперше проведено дослідження зміни стану атмосферного повітря у м. Львові у 2024р. порівняно із довосним часом.

**Методи дослідження.** Дані про стан атмосферного повітря у м. Львові було оброблено на основі аналізу і узагальнення статистичної інформації Гідрометцентру з офіційних звітів «Характеристика забруднення атмосфери» (Форма 10) за 2021 та 2024рр., наданої на підставі офіційного запиту про можливість публічного оприлюднення. Статистична обробка даних була проведена за допомогою програмного засобу [12]. Для об'єктивного порівняння станів забруднення атмосферного повітря було проаналізовано помісячні дані за 2021 та 2024рр. Статистична обробка  $n=12$  пар спостережень для кожної домішки включала:

– середнє арифметичне ( $M$ ): базовий рівень забруднення;

– парний t-критерій Стьюдента ( $p$ -value): підтвердження системності змін (значуще при  $p < 0,05$ );

– коефіцієнт кореляції Пірсона ( $r$ ): оцінка стабільності річної динаміки.

**Викладення основного матеріалу.** З початку повномасштабного вторгнення у Львові відбулися зміни у джерелах і інтенсивності впливу на стан атмосферного повітря, які пов'язані із декількома факторами.

Перш за все, безпечність міста у перші роки війни, внаслідок чого кількість населення збільшилася на 150 тис. за рахунок внутрішньо переміщених осіб [13]. За рахунок цього значно підвищилося

навантаження на транспортну мережу, яке посилюється також і за рахунок того, що Львів щороку відвідує близько 1,53 млн туристів [14]. Згідно даних прес служби Львівської міської ради, обсяги будівництва зросли на 35%, а індивідуального будівництва – на 50% порівняно з довосним періодом [15].

У перші роки війни, за даними департаменту економічної політики Львівської обласної військової адміністрації, 152 підприємства було релоковано у Львівський район включно з м. Львовом [16].

Завдяки близькості до кордону з Польщею, місто трансформувалося у головний логістичний вузол країни, що призвело не тільки до значного збільшення площі складів [17], але і до зростання обсягу ванажоперевезень.

Зважаючи на те, що опалювальний сезон у період війни супроводжується підвищеними ризиками, з ініціативи Львівської міської ради у медичних та освітніх закладах Львова були встановлені модульні котельні, обладнані твердопаливними котлами на деревині [18].

Окрім того, у Львові значна кількість мешканців приватних будинків, бізнесу та критичної інфраструктури користується генераторами, однак офіційної статистики щодо загальної кількості не існує.

Моніторинг забруднення атмосферного повітря у м. Львові здійснюється на 4 стаціонарних пунктах спостереження (рис. 1).

– пост № 1, координатний номер 401, адреса вул. Генерала Юнаківа, 1, (49.8436° N, 24.0045° E);

– пост № 2, координатний номер 303, адреса вул. Городоцька, 221, (49.8275° N, 23.9654° E);

– пост № 3, координатний номер 704, адреса пл. Соборна, 15, (49.8392° N, 24.0348° E);

– пост № 4, координатний номер 808, адреса вул. Зелена, 301, (49.7942° N, 24.0621° E).

**Пост № 1** розташований у Залізничному районі (на межі з Шевченківським) переважно з житловою забудовою та відносною віддаленістю від магістральних доріг з інтенсивним транзитним рухом.

Динаміка зміни забруднення атмосферного повітря м. Львова протягом 2021–2024рр. по посту спостереження № 1 наведена у Таблиці 1.

Як свідчать дані, наведені у таблиці 1, впродовж аналізованого періоду вміст пилу у повітрі зріс на 22,5% ( $p=0,015$ ). Концентрація оксиду карбону демонструвала стабільність (зміна +0,1%,  $p=0,99$ ), що характерно для районів з низьким трафіком, а діоксиду нітрогену незначне зниження на 2,3% ( $p=0,37$ ). Що стосується фтороводню та формальдегіду, то їх концентрація зросла відповідно на 18,0% ( $p < 0,001$ ) і 28,8% ( $p < 0,001$ ) при високій кореляції ( $r=0,80$  і  $r=0,87$ ). Водночас вміст діоксиду сульфуру значно зменшився – на 58,5% ( $p < 0,001$ ),  $r=0,59$ .

Протягом аналізованого періоду на посту № 1 випадків перевищення ГДК<sub>мр</sub> за жодною з контрольованих домішок не зафіксовано, в той час як у кратність перевищення ГДК<sub>сд</sub> за фтороводнем



Рис. 1. Мережа моніторингу якості повітря міста Львів.

Таблиця 1

**Порівняльна характеристика забруднення атмосфери  
у 2021 р. та у 2024 рр. по посту спостереження № 1**

Назва домішки	2021			2024		
	Середньорічна концентрація, мг/м <sup>3</sup>	Середнє квадратичне відхилення, мг/м <sup>3</sup>	ІЗА	Середньорічна концентрація, мг/м <sup>3</sup>	Середнє квадратичне відхилення, мг/м <sup>3</sup>	ІЗА
Пил (завислі речовини)	0,1296	0,0308	0,9	0,1604	0,0275	1,1
Діоксид сульфуру	0,0064	0,0031	0,1	0,0026	0,0018	0,1
Оксид карбону	1,8461	0,7171	0,7	1,8771	0,7967	0,7
Діоксид нітрогену	0,0373	0,0135	0,9	0,0364	0,0169	0,9
Оксид нітрогену	0,0253	0,0082	0,4	0,0244	0,0100	0,4
Фтороводень	0,0029	0,0010	0,5	0,0034	0,0016	0,6
Формальдегід	0,0069	0,0013	3,0	0,0089	0,0036	4,1

і формальдегідом становила у 2021р. та у 2024р., відповідно 2,9 і 3,4 та 2,3 і 3,0 разів.

**Пост № 2** знаходиться у західній частині міста і є типовим транспортно-промисловим мікрорайоном. Поруч знаходяться великі логістичні вузли, торгові центри та промислові зони (район колишнього заводу Сільмаш). Вулиця Городоцька знаходиться на одній із головних транспортних магістралей Львова і є основною артерією, що з'єднує центр міста з кільцевою дорогою та аеропортом. Все це зумовлює особливості забруднення повітря у даному мікрорайоні (Таблиця 2).

Так, вміст пилу зріс на 15,8% ( $p=0,032$ ). Концентрація діоксиду нітрогену впродовж обох аналізованих років була високою – 0,0502 мг/м<sup>3</sup> і 0,0514 мг/м<sup>3</sup> (+3,5%,  $p=0,26$ ) і перевищувала ГДК<sub>сд</sub> у 1,25 і 1,29 разів. Цей показник є найбільш стабільним серед усіх домішок ( $r=0,82$ ), що є характерним для зон з інтенсивним транспортним рухом. Вміст фтороводню і формальдегіду статистично значимо зріс, відповідно на 21,3% ( $p=0,001$ ) і 17,9% ( $p<0,001$ ) при  $r=0,61$  і  $r=0,78$  і перевищував ГДК<sub>сд</sub> у 3,3 разів. Водночас, зафіксовано зниження середньої концен-

Таблиця 2

**Порівняльна характеристика забрудненням атмосфери у 2021 р. та у 2024 рр. по посту спостереження № 2**

Назва домішки	2021			2024		
	Середньорічна концентрація, мг/м <sup>3</sup>	Середнє квадратичне відхилення, мг/м <sup>3</sup>	ІЗА	Середньорічна концентрація, мг/м <sup>3</sup>	Середнє квадратичне відхилення, мг/м <sup>3</sup>	ІЗА
Пил (завислі речовини)	0,1466	0,0343	1,0	0,1687	0,0330	1,1
Діоксид сульфуру	0,0094	0,0054	0,2	0,0052	0,0032	0,1
Оксид карбону	2,2721	1,0224	0,8	1,9722	0,8366	0,7
Діоксид нітрогену	0,0502	0,0227	1,3	0,0514	0,0250	1,3
Оксид нітрогену	0,0332	0,0136	0,6	0,0336	0,0153	0,6
Фтороводень	0,0032	0,0012	0,6	0,0039	0,0018	0,7
Формальдегід	0,0084	0,0030	3,8	0,0099	0,0039	4,7

Таблиця 2

**Порівняльна характеристика забрудненням атмосфери у 2021 р. та у 2024 рр. по посту спостереження № 3**

Назва домішки	2021			2024		
	Середньорічна концентрація, мг/м <sup>3</sup>	Середнє квадратичне відхилення, мг/м <sup>3</sup>	ІЗА	Середньорічна концентрація, мг/м <sup>3</sup>	Середнє квадратичне відхилення, мг/м <sup>3</sup>	ІЗА
Пил (завислі речовини)	0,1519	0,0388	1,0	0,1718	0,0388	1,2
Діоксид сульфуру	0,0097	0,0063	0,2	0,0053	0,0033	0,1
Оксид карбону	2,3695	1,0500	0,8	2,0105	0,8545	0,7
Діоксид нітрогену	0,0546	0,0246	1,4	0,0532	0,0259	1,3
Фтороводень	0,0034	0,0013	0,6	0,0044	0,0020	0,8
Формальдегід	0,0093	0,0034	4,3	0,0122	0,0045	6,2

трації оксиду карбону на 13,3% (з 2,2721 до 1,9722). Значення  $p=0,064$  вказує на тенденцію, що наближається до статистичної значущості. Зменшилося також число випадків перевищення ГДК<sub>мр</sub> за даною забруднювальною речовиною з 16 у 2021р. (повторюваність 2,9% від загальної кількості спостережень) до 1 у 2024р. (повторюваність 0,2%). Вміст діоксиду зменшився ще більш суттєво – на 44,6% ( $p<0,001$ ),  $r=0,42$ .

**Пост № 3** знаходиться у самому центрі міста, у межах історичного ареалу, що входить до спадщини ЮНЕСКО. Це мікрорайон із надзвичайно щільною історичною забудовою та вузькою вуличною мережею. Площа є великим транспортним хабом, де перетинаються основні трамвайні та автобусні маршрути міста.

У Таблиці 3 наведено дані про стан забруднення атмосферного повітря м. Львова по посту спостереження № 3.

Концентрація пилу збільшилася на 13,1% ( $p=0,039$ ) до 1,15 ГДК<sub>сд</sub>. Коефіцієнт кореляції ( $r=0,52$ ) вказує на появу нових, менш стабільних джерел пилоутворення. Забруднення діоксидом нітрогену вказувало на високу стабільність ритму ( $r=0,88$ ) при

незначній зміні середніх величин (-1,9%). Відбулося також зростання вмісту фтороводню на 26,4% ( $p<0,001$ ). Критичне накопичення було зафіксовано для формальдегіду (+31,1%,  $p<0,001$ ),  $r=0,76$ . В той же час, для діоксиду сульфуру і оксиду карбону відбулося статистично підтвержене покращення ситуації: (-45,9%,  $p<0,001$ ) і (-14,9%,  $p=0,042$ ). При цьому, частота перевищення ГДК<sub>мр</sub> для СО зменшилася з 20 випадків до 1, а повторюваність з 3,4% до 0,2% від загальної кількості спостережень.

**Пост № 4** розташований у південно-східній частині міста Сихівського району. Район характеризується поєднанням великих промислових підприємств, складських комплексів та інтенсивної житлової забудови Сихівського масиву неподалік. Вулиця Зелена є важливою виїзною магістраллю у напрямку Івано-Франківська.

У 2024р. зафіксовано значуще зростання концентрації пилу на 17,6% ( $p=0,015$ ). Вміст формальдегіду збільшився на 30,1% ( $p<0,001$ ),  $r=0,87$  і перевищив ГДК<sub>сд</sub>, у 3,7 разів; а фтороводню – аномально зріс на 35,4% ( $p<0,001$ ) до 4,8 ГДК<sub>сд</sub>, що є рекордним показником у місті. Щодо оксиду карбону і діоксиду нітрогену, то спостерігається стабільність показни-

**Порівняльна характеристика забрудненням атмосфери  
у 2021 р. та у 2024 рр. по посту спостереження № 4**

Назва домішки	2021			2024		
	Середньорічна концентрація, мг/м <sup>3</sup>	Середнє квадратичне відхилення, мг/м <sup>3</sup>	ІЗА	Середньорічна концентрація, мг/м <sup>3</sup>	Середнє квадратичне відхилення, мг/м <sup>3</sup>	ІЗА
Пил (завислі речовини)	0,1380	0,0328	0,9	0,1584	0,0244	1,1
Діоксид сульфуру	0,0082	0,0058	0,2	0,0044	0,0029	0,1
Оксид карбону	1,9351	0,8356	0,7	1,8310	0,7639	0,6
Діоксид нітрогену	0,0469	0,0202	1,2	0,0456	0,0215	1,1
Фтороводень	0,0036	0,0016	0,7	0,0048	0,0022	1,0
Формальдегід	0,0087	0,0025	4,0	0,0112	0,0042	5,6

ків: (-3,9%,  $p=0,59$  і (-2,2%,  $p=0,58$ ). Концентрація діоксиду сульфуру, подібно до попередніх постів спостереження, знизилася – на 47,1% ( $p < 0,001$ ).

Аналіз даних Таблиць 1-4 вказує на те, що найвищий показник ІЗА за аналізовані періоди відмічається для формальдегіду (Рис. 2).

Найбільше зростання відмічено на постах № 3 і № 4, відповідно з 4,3 до 6,2 і 4,0 до 5,6, ГДК<sub>сд</sub>, хоча перевищення ГДК<sub>мр</sub> спостерігалось лише в 1 випадку по посту № 3 у 2021р. Такий високий рівень забруднення є вкрай небезпечним, оскільки наявність формальдегіду у атмосферному повітря призводить до алергій, респіраторних захворювань, підвищує ризик смертності від серцево-судинних та захворювань органів дихання, генетичних змін та канцерогенезу і класифікується Міжнародним агентством з дослідження раку (IARC) як один із канцерогенів групи 1 [19].

Комплексні показники індексу забруднення атмосферного повітря (КІЗА) наведені на рисунку 3.

Хоча кількість випадків перевищення ГДК<sub>мр</sub> у 2024р. зменшилася (особливо по оксиду карбону),

КІЗА по місту зріс. Наприклад, на посту № 3 він піднявся з 8,13 (у 2021р.) до 10,19 (у 2024р.). Це сталося переважно через зростання середньорічної концентрації формальдегіду, що є критичним для екологічної оцінки стану повітря у Львові.

**Головні висновки.** Позитивний тренд зниження у м. Львові діоксиду сульфуру (на 45–58%) свідчить про покращення якості палива по всьому місту, тоді як зростання пилу (на 13–22%) на всіх постах відображає негативний вплив транспортного навантаження, активного будівництва та, ймовірно, викидів від твердопаливних котлів та електрогенераторів, якими були оснащені критичні об'єкти інфраструктури, а також у змін у режимі прибирання доріг у поєднанні з кліматичними чинниками.

1. Пост № 1 (житловий мікрорайон) демонструє найменші рівні оксиду карбону та діоксиду нітрогену, що підтверджує його статус найбільш екологічно безпечної житлової зони у вибірці, попри загальноміські негативні тенденції щодо пилу та формальдегіду.

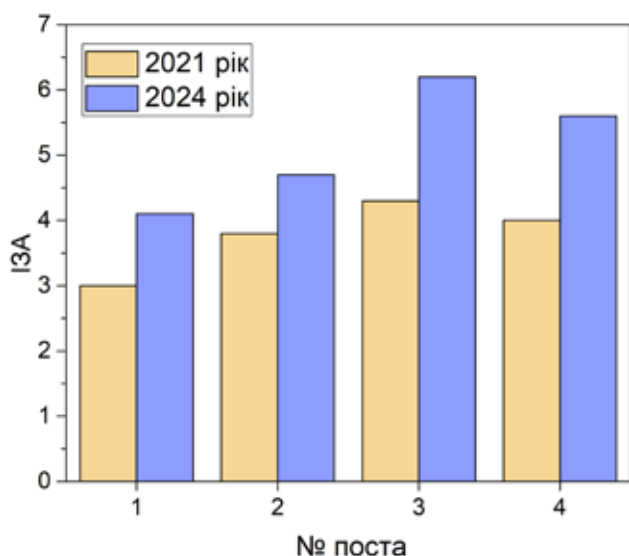


Рис. 2. ІЗА для формальдегіду у 2021р. і у 2024р.

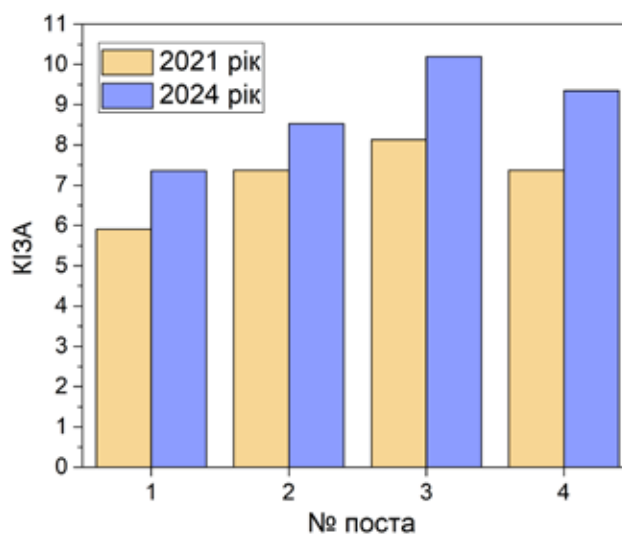


Рис. 3. КІЗА м. Львова впродовж 2021р. і 2024р.

2. Найвищі концентрації та найбільший ріст формальдегіду (+31,1%) на пл. Соборній (пост № 3) є наслідком щільної історичної забудови, яка створює ефект «вуличного каньйону». Вузькі вулиці обмежують аерацію, що призводить до акумуляції продуктів фотохімічних реакцій у приземному шарі повітря.

3. Основним фактором, який визначає якість атмосферного повітря на вул. Городоцькій та в центрі (пости № 2 та № 3) є магістральний. Стабільно висока кореляція по діоксиду нітрогену ( $r=0,82-0,88$ )

підтверджує незмінність транспортного джерела забруднення. Ці мікрорайони залишаються зонами постійного екологічного ризику через інтенсивність трафіку.

4. (Пост № 4) є промисловим відбитком Сихова. Аномальний приріст фтороводню (+35,4%) зафіксовано лише в районі вул. Зеленої. Це прямо вказує на специфічний техногенний вплив промислового вузла, де процеси спалювання або хімічного виробництва стали інтенсивнішими у 2024 році.

### Література

1. Air pollution accounted for 8.1 million deaths globally in 2021, becoming the second leading risk factor for death, including for children under five years: press release / UNICEF. 2024. 18 June. URL: <https://www.unicef.org/press-releases/air-pollution-accounted-81-million-deaths-globally-2021-becoming-second-leading-risk> (дата звернення: 23.01.2026).
2. The Invisible Killer – Air Pollution can be deadly: multimedia detail / World Health Organization. 2021. 18 May. URL: <https://www.who.int/multi-media/details/the-invisible-killer---air-pollution-can-be-deadly> (дата звернення: 23.01.2026).
3. Voznyak O., Yurkevych Y., Dovbush O. et al. Monitoring the state of the air environment in the Lviv region. *Journal of Town Planning and Architecture*. 2022. Vol. 4, No. 1. P. 49–56. DOI: 10.23939/jtbp2022.01.049.
4. Zaporozhets A., Babak V., Sverdlova A. et al. Review of the state of air pollution by energy objects in Ukraine. *System Research in Energy*. 2022. No. 2(71). P. 42–52. DOI: 10.15407/srenergy2022.02.042.
5. Chugai A., Nedostrellov M., Lutek W. Assessment of technogenic load on the air basin of the Western Ukraine regions. *Journal of Environmental Problems*. 2025. Vol. 10, No. 2. P. 104–109. DOI: 10.23939/ep2025.02.104.
6. Огляд стану забруднення навколишнього природного середовища на території України у 2024 році / Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Срезневського. Київ, 2025. 58 с. URL: [http://cgo-sreznevskyi.kyiv.ua/images/ОГЛЯД\\_2024\\_повний\\_варіантdoc\\_1-сжатый.pdf](http://cgo-sreznevskyi.kyiv.ua/images/ОГЛЯД_2024_повний_варіантdoc_1-сжатый.pdf) (дата звернення: 23.01.2026).
7. Кузик А. Д., Думас І. З., Олійник О. Т. Забруднення атмосферного повітря автомобільним транспортом на в'їздах до м. Львова. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2024. № 29. С. 12–23. DOI: 10.32447/20784643.29.2024.02.
8. Кочмар І., Яцишин М. Оцінка якості атмосферного повітря на вулицях і перехрестях центральної частини м. Львова за 2016–2023 рр. *Building, Civil Engineering and Architecture*. 2025. № 19. С. 267–301. DOI: 10.32447/bcet.2025.19.
9. Согор А. Р., Зазуляк П. М. Картографування екологічного забруднення повітря міста Львів. *Космічна наука і технологія*. 2024. Т. 28, № 3. С. 8–8. DOI: 10.15407/knit2022.03.086.
10. Чугай А., Чернякова О., Мозговий А., Скалозуб М. Оцінка стану повітряного басейну регіонів Західної України за показниками сталого розвитку. *Проблеми хімії та сталого розвитку*. 2025. № 3. С. 106–114. DOI: 10.32782/pcsd-2025-3-12.
11. Chugai A., Nedostrellov M., Lutek W. Assessment of technogenic load on the air basin of the Western Ukraine Regions. *Environmental Problems*. 2025. Vol. 10, No. 2. P. 97–103. DOI: 10.23939/ep2025.02.104.
12. Gemini 3: мовна модель штучного інтелекту / Google. 2026. URL: <https://gemini.google.com> (дата звернення: 23.01.2026).
13. Населення Львова досягло мільйона жителів. *Кореспондент.net*. 2024. 21 листопада. URL: <https://ua.korrespondent.net/city/lvov/4724943-naseleння-lvova-dosiahlo-miliona-zhyteliv> (дата звернення: 23.01.2026).
14. Статистика туризму: Відкриті дані Львова. URL: <https://dashboard.city-adm.lviv.ua/statystyka/turyzm> (дата звернення: 23.01.2026).
15. 5 будівельних тенденцій Львова: від збільшення часу будівництва до ціни за квадратний метр / Львівська міська рада. 2025. 22 листопада. URL: <https://city-adm.lviv.ua/news/architecture-and-historic-heritage/5-budivelnnykh-tendentsii-lvova-vid-zbilshennia-chasu-budivnytstva-do-tsiny-za-kvadratnyi-metr/> (дата звернення: 23.01.2026).
16. Скільки підприємств перебудували на Львівщину за час повномасштабного вторгнення. *Дивись.info*. 2024. 7 жовтня. URL: <https://dyvys.info/2024/10/07/skilky-pidpryemstv-perebazuvaly-na-lvivshhynu-za-chas-povnomasshtabnogo-vtorgnennya-rf/> (дата звернення: 23.01.2026).
17. Велика війна перетворює Львів на головний логістичний хаб країни / Alterra Group. 2024. 10 березня. URL: <https://alterragroup.com.ua/velika-viyna-peretvoryuie-lviv-na-golo.html> (дата звернення: 23.01.2026).
18. Львівтеплоенерго встановлює модульні котельні на альтернативному паливі в освітніх закладах / Львівська міська рада. 2023. 14 листопада. URL: <https://city-adm.lviv.ua/news/city/housing-and-utilities/lvivteploenerho-vstanovliuie-modulni-kotelni-na-alternatvnomu-palyvi-v-osvitnikh-zakladakh-video/> (дата звернення: 23.01.2026).
19. Protano C., Buomprisco G., Cammalleri V. et al. The Carcinogenic Effects of Formaldehyde Occupational Exposure: A Systematic Review. *Cancers*. 2022. Vol. 14, Iss. 1. Art. 165. DOI: 10.3390/cancers14010165.

Дата першого надходження статті до видання: 27.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026

---

# ЕКОЛОГІЯ ВОДНИХ РЕСУРСІВ

---

УДК 502.3:504.4:628.16(282.247.32)

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.1-64.6>

## ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ ВІЙНИ ДЛЯ ВОДНИХ ЕКОСИСТЕМ СІВЕРСЬКОГО ДІНЦЯ (ОГЛЯД)

Божко Т.В., Пономаренко Д.В.

Регіональний офіс водних ресурсів у Харківській області  
вул. Космічна, 21, 61165, м. Харків  
tbozko082@gmail.com, bnsrega@gmail.com

У статті розглянуто екологічні наслідки воєнних дій для водних екосистем суббасейну Сіверського Дінця – одного з найбільш постраждалих річкових басейнів України. Руйнування гідротехнічних споруд, вибухи, пожежі та розливи нафтопродуктів сформували комплекс фізичних, хімічних, гідрологічних і біологічних факторів, що суттєво вплинули на стан річкових екосистем. Встановлено, що до водних об'єктів надходить широкий спектр токсичних речовин: вибухові речовини та продукти їх розкладу, нафтопродукти, важкі метали (Pb, Cd, Cu, Zn, Ni, Cr, Hg), поліциклічні ароматичні вуглеводні, а також сполуки азоту, фосфору й інші органічні домішки техногенного походження. Ці забруднювачі чинять комбінований токсичний вплив на аквабіоценози, зумовлюючи як гостру смертність організмів, так і хронічні сублетальні ефекти, включно з оксидативним стресом, біоаккумуляцією та репродуктивними порушеннями. Показано, що сукупність воєнно-індукованих стресових факторів спричиняє трансформацію трофічних зв'язків, деградацію структурно-функціональної організації біоценозів та порушення природних процесів самоочищення та самовідновлення річкових систем. Водночас довгострокові екологічні наслідки залишаються неповністю визначеними та потребують комплексних досліджень. Військова агресія породжує ризики, які направлені на порушення водної безпеки. Наслідки воєнних дій носять довготривалий характер і є проявом водного тероризму. На окупованих територіях місцеве населення і до цих пір залишається без належного доступу до води та позбавлене елементарних санітарних умов. Допоки триває війна і йдуть активні бойові дії, немає змоги навіть оцінити наслідки завданої шкоди. А без докладної фахової оцінки стану постраждалих екосистем їх не вдасться відновити до попереднього стану.

Зроблено висновок, що ефективна оцінка впливу війни на водні ресурси можлива лише за умов відновлення системного, просторово репрезентативного та регулярного моніторингу, а також подальшого накопичення даних щодо екологічних змін у суббасейні Сіверського Дінця. *Ключові слова:* Сіверський Дінець; водні екосистеми; воєнні дії; токсичне забруднення; аквабіоценоз; гідроекологічні ризики; екологічні наслідки

### **The influence of military actions on the state of water resources and ecosystems of the northern donets. Bozhko T., Ponomarenko D.**

The article analyzes the ecological consequences of military actions for the water ecosystems of the Siverskyi Dnests sub-basin – one of the most affected river basins of Ukraine. The destruction of hydraulic structures, explosions, fires and oil spills has generated a complex set of physical, chemical, hydrological and biological stressors that have significantly affected the condition of river ecosystems. It has been established that a broad spectrum of toxic substances enters water bodies, including petroleum hydrocarbons, heavy metals (Pb, Cd, Cu, Zn, Ni, Cr, Hg), polycyclic aromatic hydrocarbons, explosive compounds and their degradation products, as well as nitrogen-, phosphorus-containing compounds and other technogenic organic pollutants. These contaminants exert combined toxic effects on aquatic biocenoses, causing both acute organism mortality and chronic sublethal impacts, such as oxidative stress, bioaccumulation and reproductive disorders. The study demonstrates that the combined influence of warfare-induced stressors leads to the transformation of trophic interactions, degradation of the structural and functional organisation of biocenoses, and disruption of natural processes of self-purification and self-recovery in river systems. At the same time, the long-term ecological consequences remain insufficiently defined and require comprehensive further investigation. It is concluded that an effective assessment of the war's impact on water resources is possible only through the restoration of systematic, spatially representative and regular environmental monitoring, as well as the continued accumulation of data on ecological transformations within the Siverskyi Donets sub-basin. *Key words:* Siverskyi Donets; aquatic ecosystems; military actions; toxic pollution; aquabiocenosis; hydroecological risks; environmental consequences.

**Актуальність проблеми.** Сіверський Донець є найбільшою водною артерією сходу України, басейн якої охоплює площу близько 98,9 тис. км<sup>2</sup>. Із початком повномасштабної війни Росії проти України бойові дії відбувалися практично вздовж усього русла річки та її приток. Унаслідок цього

басейн Сіверського Дінця зазнав одного з найвищих рівнів воєнного і антропогенного навантаження серед українських річкових систем, що значно підвищило вразливість його екосистем і створило суттєві ризики для якості прісної води та водокористування. Комплекс цих факторів сприяє глибоким



© Божко Т.В., Пономаренко Д.В., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

змінам в життєдіяльності річкових екосистем: ураженню річної біоти; руйнуванню трофічних зв'язків, зокрема ланцюжків живлення; деградації функцій біоценозів та пригніченню природних процесів самоочищення. Проте існуючі дані залишаються фрагментарними, а просторовий моніторинг недостатнім через небезпеку проведення досліджень. Це обумовлює нагальну потребу в комплексному аналізі масштабів і наслідків воєнного впливу на водні екосистеми регіону.

**Постановка задачі.** Стаття має оглядовий характер і узагальнює існуючу інформацію щодо впливу і наслідків бойових дій на гідрологію і гідробіологію водних екосистем. Задача досліджень – оцінити характер і інтенсивність фізичних, хімічних, гідрологічних та біологічних факторів стресу (стресорів), що виникли внаслідок бойових дій у суббасейні Сіверського Дінця; проаналізувати спектр основних небезпечних речовин, які надходять у водні об'єкти регіону; визначити механізми їхнього потенційного впливу на водні біоценози; встановити можливі біологічні наслідки токсичного навантаження на гідробіонтів, порушення трофічних зв'язків; визначити вимоги до достовірного контролю екологічних змін у суббасейні Сіверського Донця.

**Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.** Дослідження спрямовані на розв'язання актуальних наукових і практичних завдань, пов'язаних з оцінкою техногенного впливу на суббасейн Сіверського Донця під час широкомасштабної війни і розширюють сучасні уявлення про механізми деградації річкових екосистем під дією комплексних факторів військового походження.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Світова онлайн-база Water Conflict Chronology (Хронологія водних конфліктів) систематизує події, пов'язані з конфліктами, загостреннями або суперечками щодо води: її доступу, якості, забруднення чи контролю над водними ресурсами. Згідно з класифікацією цієї бази, події, зафіксовані у водному просторі України під час війни, належать до категорії «Нещасний випадок» (Accidental / Unintended) або «Жертва» (Casualty), у межах якої шкода водним ресурсам, системам водопостачання або пов'язаним із ними людям завдається навмисно або ненавмисно [1]. Такі інциденти розглядаються як порушення загальноприйнятих міжнародних норм ведення збройних конфліктів. База Water Conflict Chronology містить задокументовані випадки насильства й пошкоджень, пов'язаних із водними ресурсами, зокрема численні інциденти, що відображають негативний вплив воєнних дій на річкові системи України, у тому числі зафіксовані події в басейні Сіверського Дінця, який став одним із ключових водних об'єктів, уражених війною [2]. Основними чинниками негативного впливу в зонах активних бойових дій, які охоплюють водну сферу, стали руйнування інже-

нерних гідротехнічних споруд, забруднення поверхневих і підземних вод техногенними речовинами, продуктами вибухів, побутовими та небезпечними відходами, залишками пально-мастильних матеріалів [3 – 6]. Наслідки цих подій можуть спричинити екологічну катастрофу у водній сфері України.

Окрему загрозу становить пошкодження або знищення водоочисних споруд у прифронтових районах. У ході бойових операцій в суббасейні Сіверського Дінця було зафіксовано численні надзвичайні ситуації, що спричинили пошкодження й руйнування очисних споруд і гідротехнічних об'єктів: у Харківській області знищено або суттєво пошкоджено понад 170 об'єктів водопостачання та водовідведення. За попередніми оцінками, станом на початок 2024 року було зруйновано більше 1947 погонних км водопровідних мереж, частково пошкоджено або повністю зруйновано 25 водопровідних очисних споруд. Найбільше – у Харківській, Луганській та Донецькій областях. За попередніми оцінками, було пошкоджено понад 582 погонних км каналізаційних мереж, частково пошкоджено або повністю зруйновано 183 каналізаційних насосних станцій, більшість з яких знаходяться у Харківській області. Зруйновані або пошкоджені також 51 каналізаційна очисна споруда [7].

Найбільші екологічні зміни були пов'язані з руйнуванням Оскільської греблі (на межі Харківської та Донецької областей) і пошкодженням Печенізької греблі (у Харківській області). Ці події створили ризики забруднення водних об'єктів, затоплення територій, дефіциту водних ресурсів, втрати водної біоти та зростання екологічних загроз.

Руйнування Оскільської греблі спричинило одну з наймасштабніших екологічних катастроф у басейні Сіверського Дінця: понад 350 млн м<sup>3</sup> води неконтрольовано надійшло до основного русла, що оголило близько 9 тис. га замуленого дна водосховища. Це призвело до масової загибелі літофільних риб, знищення лімнофільних і лімnobентосних організмів та інших гідробіонтів, які не змогли мігрувати до річки [8]; було знищено місця зимівлі й нересту багатьох видів, що використовували мілководні затоплені ділянки. Дестабілізація рівневого режиму води спричинила руйнування прибережних біоценозів та порушення водного балансу регіону.

Після влучання ракети по Печенізькій греблі у 2022 році, часткове її руйнування (за даними Державної екологічної інспекції) призвело до втрати води у Печенізькому водосховищі обсягом понад 111,8 млн. м<sup>3</sup>. У 2023 році рівень води спостерігався на 1,64 метра нижче допустимого, що вплинуло на водні та прибережні екосистеми. У 2025 р. наповнення Печенізького водосховища склало 73% але руйнування греблі загрожувало значним підтопленням територій, масової загибелі риб, моллюсків та інших гідробіонтів [9, 10].

Велику небезпеку для простору басейна Сіверського Дінця несе неконтрольоване затоплення

шахт на територіях Донецької і Луганської областей. Це величезна небезпека для водних екосистем за рахунок формування довготривалих, хронічних джерел забруднення через перетоку техногенних розчинів, зростання мінералізації, надходження високотоксичних хімічними сполуками (бензолу, толуолу, фенолу, метанолу, хлорбензолу, формальдегіду, моноетаноламіну тощо), важких металів, нафтопродуктів, токсичних сполук, і як наслідок, деградації біоценозів та зниження здатності річок до самоочищення [11, 12].

Великою техногенною подією було знищення інфраструктури Зміївської ТЕС – охолоджувальних водойм, золівдвалів, технічних каналів. Наслідком руйнування енергоблоків було припинення скиду підігрітих вод і порушення гідрологічного режиму у вигляді термоградієнту, який, зазвичай, сприяв формуванню і функціонуванню термотолерантної біоти. За даними науковців аналогічні події приводять до масового знищення адаптованих угруповань біоценозу, пристосованого до існування у середовищі з підвищеною температурою [8]. Імовірними наслідками є виникнення локальної гіпоксії, забруднення води завислими частинками золи, важкими металами та іншими токсичними сполуками, підвищення лужності водного середовища, а також кумулятивний ефект накопичення забруднювальних речовин у донних відкладах. Це дає підстави припускати погіршення якості води в р. Сіверський Дінець та розвиток токсичного впливу на іхтіофауну й бентосні організми. Водночас обмеженість фактичних даних зумовлює необхідність проведення цілеспрямованих комплексних наукових досліджень для об'єктивної оцінки стану водної екосистеми в районі руйнування ТЕС.

Руйнування нафтобази в Харкові у 2024 році спричинило надходження до річки Немишля близько 3 тисяч тонн нафтопродуктів, що призвело до екстремального забруднення: рівень нафтопродуктів перевищував екологічні нормативи приблизно у 820 разів. Забруднення поширювалося каскадно річковою мережею – через річки Харків, Лопань та Уди і згодом вплинуло на якість акваторії Сіверського Дінця, де на окремих ділянках також фіксувалося перевищення екологічних нормативів за нафтопродуктами в 3,7 разів [3]. За попередніми оцінками, загальна площа забруднених водних поверхонь і берегових смуг становила близько 780000 м<sup>2</sup>, що створило значне навантаження на річкові екосистеми та призвело до порушень гідробіологічних процесів різного ступеня. Оперативні протиаварійні заходи (встановлення бонових загороджень, застосування сорбентів, локалізація і вилучення забруднених фракцій) дозволили поступово знизити концентрації нафтопродуктів у воді. Після заходів рівень забруднення Сіверського Дінця поступово повернувся до значень, близьких до нормативних.

За орієнтовними даними Державної екологічної інспекції України станом на кінець серпня 2025 року, загальні збитки, завдані водним ресурсам України, перевищували 117 млрд. грн, з яких понад 60 % припадало на поверхневі водні об'єкти басейну Сіверського Дінця.

Водночас слід відзначити і певні позитивні зміни, зокрема зменшення антропогенного навантаження, яке пов'язане зі скороченням обсягів скидів стічних вод унаслідок руйнування, зупинки або часткового функціонування промислових об'єктів у зоні бойових дій і на прилеглих територіях. Так, об'єми скидів забруднених стічних вод в басейн Сіверського Дінця в 2024 році склали – 8,038 млн. куб. м, що майже в 3 рази менше ніж у 2021 році. Це локально сприяло покращенню води за окремими гідрохімічними показниками.

Моніторинг 2017 року (Звіт ОБСЄ) [11], стану поверхневих вод Сіверського Дінця (у період військових операцій) на підконтрольній Україні території, порівняно з результатами аналізу річної води і донних відкладів у 2013 року, не виявив значних змін за вмістом важких металів, нафтопродуктів, специфічних органічних речовин. За даними моніторингу хімічний стан води, у цілому, оцінювався, як “добрий”, “наближений до доброго”. За результатами останніх досліджень (дані моніторингу 2022 – 2024 років) масивів поверхневих вод Сіверського Донця в Харківській та Донецькій областях, які проводилися у 45 пунктах моніторингу, річки залишаються частково забрудненими. Встановлено перевищення гранично допустимих концентрацій за інтегральними показниками органічного забруднення – ХСК і БСК-5, іонами амонію, нітрит-іонами, частково нафтопродуктами, спостерігалось перевищення вмісту марганцю і кадмію. Лабораторними дослідженнями Сіверсько-Донецького басейнового управління водних ресурсів Держагентства водних ресурсів України в басейні р. Уди встановлено перевищення нормативів по поліароматичним вуглеводням, які утворюються внаслідок горіння палива, у 1,5 – 7 разів. А в басейні р. Сіверський Донець, у 2023 році, було зафіксовано наявність у воді нафтопродуктів, які раніше у районах поверхневих питних водозаборів взагалі не фіксувались [13]. У різних контрольних пунктах, за хімічними показниками, стан Сіверського Дінця оцінювали, як «слабко забруднений», «помірно забруднений», «брудний» [14]. За оцінкою ризику щодо досягнення доброго екологічного стану/потенціалу масиву поверхневих вод району басейну річки Дон на території України – «без ризику» недосягнення доброго екологічного стану знаходиться 1 об'єкт, «можливо під ризиком» – 114 об'єктів, «під ризиком» – 584 об'єктів [15].

Значні перевищення забруднюючих речовин реєстрували переважно на ділянках, що безпосередньо постраждали від військових інцидентів, техногенних аварій або локальних катастроф, де спостеріга-

лися різке короткострокове підвищення токсичності. Однак повна і достовірна оцінка екологічного стану басейну Сіверського Дінця істотно ускладнена. Через активні бойові дії, мінування, руйнування інфраструктури та постійні обстріли значна частина території залишається недоступною для безпечного та систематичного моніторингу, що не дозволяє отримати репрезентативні дані щодо масштабів економічних і екологічних втрат.

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** Наявна інформація про руйнування, забруднення та деградацію водних екосистем має фрагментарний характер, тому для формування цілісної картини необхідні комплексні та довгострокові дослідження (можливих відтермінованих наслідків), які зможуть бути здійснені лише після стабілізації безпекової ситуації та припинення активних бойових дій.

**Новізна.** Здійснено інтегральну оцінку воєно-техногенного впливу на водні екосистеми суббасейну Сіверського Дінця під час повномасштабних бойових дій, яка поєднує аналіз фізичних, хімічних, гідрологічних та біологічних факторів порушення екосистем.

**Методи досліджень:** аналітичні (аналіз інформації з офіційних джерел, які здійснюють контроль та моніторингові спостереження в регіоні; аналіз наукових досліджень у сфері впливу техногенних стресорів і токсичних речовин на стан аквабіоти).

**Основні дослідження.** Як було встановлено, бойові дії можуть спричинити широкомасштабну екологічну катастрофу у водній сфері України за наслідками:

- руйнування водної інфраструктури, очисних споруд;
- порушення процесу водокористування населенням та підприємствами;
- прямого механічного хімічного та біологічного забруднення поверхневих водних об'єктів та підземних вод.

Найнебезпечнішими наслідками є масове затоплення військової техніки та боєприпасів; виток нафтопродуктів і паливно-мастильних матеріалів та інших небезпечних хімічних сполук, як продуктів вибуху снарядів так й внаслідок руйнування великих промислових об'єктів; біологічне забруднення через велику кількість трупів людей і тварин.

Бойові дії формують масштабний комплексний вплив на екологію річок, у тому числі, аквобіоценози – від зміни фізико-хімічних параметрів до глибоких трансформацій біотичних компонентів, які можуть мати тривалі або незворотні наслідки. На рисунку надана схема наслідків озброєного конфлікту.

Форсування річок, обстріли та знищення гідроспоруд призводять до порушення цілісності ґрунтів дна та берегів і зміни природного русла в місцях боїв.

У річці та на прибережних смугах залишаються затоплені вибухонебезпечні предмети снаряди, міни та рештки вибухівки. Використання снарядів різного типу, включно з можливим використанням фосфорних бомб, спричиняє потрапляння у воду токсичних речовин, у тому числі, важких металів, та продуктів розпаду вибухівки, що створює пряму токсичну дію на живі організми.

Боєприпаси (артилерійські снаряди, ракети та інші) являють складні конструкції, переважно складені з металевого корпусу (оболонки), наповненого вибуховою речовиною, а також металю заряду (палива) та ініціюючого пристрою (детонатора). Вибухові речовини поділяють на первинні (гримуча ртуть, азид свинцю) – ініціатори детонації і вторинні (тринітролуол, гексоген, октоген, тетрил, пікрінова кислота, амоніти). Метали є супутніми компонентами боєприпасів і потрапляють у довкілля внаслідок вибухів, корозії уламків та розсіювання матеріалів оболонок. Найбільш поширеними є свинець, мідь, сурма, кадмій, хром, нікель, ртуть та миш'як, які характеризуються високою токсичністю, здатністю до біоаккумуляції та тривалого збереження у ґрунтах і донних відкладах [16]. Хімічні сполуки вибухових пристроїв, у тому числі, підвищені концентрації металів, що утворюються внаслідок вибухів, створюючи суттєві екологічні ризики для водних систем. Руйнування очисних споруд і неконтрольоване скидання стічних вод призводить до підвищення концентрації сполук азот, фосфору, органічних речовин і хвороботворних мікроорганізмів.

Комплексна характеристика небезпечних сполук військового походження у водних екосистемах: властивості, біотрансформація та екологічні ефекти – надані у таблиці.

Наслідком воєнних дій є страждання біоти і деградація екосистем. Від ударних хвиль від вибухів може відбуватися миттєва загибель риб у радіусі десятків метрів, руйнуватися нерестилища, знищуватися планктон та інша мікрофауна; зміна структури русла і осипання берегів приводить до втрати біотопів для нересту, знищення бентосу.

Збройні конфлікти створюють багаторівневі загрози для водних екосистем, що проявляється у зміні гідрологічного режиму, токсичному забрудненні та деградації водної біоти. Так, спостерігається пригнічення водних екосистем у результаті руйнування гідроспоруд, дамб і промислових об'єктів (Senckenberg Institute, 2022; Springer Open, 2025). Як наслідок бойових дій відмічені масові зміни у мікродоростях і макрофітах (Khmara et al., 2024). У місцях катастроф зафіксовані суттєві забруднення вод важкими металами та продуктами вибухів (Melnyk et al., 2025). Збільшення біогенних речовин у воді, особливо сполук фосфору, сприяє розвитку автотрофних організмів, що порушає рівновагу серед гідробіонтів, стимулюючи розвиток сине-зельоних водоростей і погіршення якості води.



Рис. 1. Схема причинно-наслідкових військових дій

Науковці відзначають, що одним із найбільш вразливих компонентів є спільноти простіших організмів, які першими реагують на зміну хімічного складу води та надходження токсикантів (Ivanov et al., 2023).

Донні біоценози (особливо макрзообентос) страждають від накопичення металів і органічних сполук у донних відкладах, що знижує різноманіття та спричиняє довготривалі структурні зміни (SpringerOpen, 2025). Це екологічна група водних безхребетних (одноденок, ручайників, кам'янок), які притаманні водним екосистемам Сіверського Дінця і є індикаторною групою якісного стану води через чутливість до забруднення і змін у довкіллі. Вони

швидко зникають у зонах вибухів, замулювання, підвищення токсичності і повільно відновлюються; їх відсутність у раніше чистих ділянках є сигналом екологічного порушення.

Іхтіофауна також зазнає комплексного тиску: токсичного (важкі метали, нафтові вуглеводні, нітросполуки), гідрологічного (зміна течії, рівня води), а також фізичного (ударні хвилі вибухів), також відзначається різке скорочення чисельності окремих видів риб у басейнах річок, що розташовані в зоні активних бойових дій [16 – 18].

В результаті гідрохімічного забруднення можуть проявитися такі ефекти, як пригнічення фітопланк-

Таблиця 1

## Екотоксикологічні характеристики і механізм впливу вибухових речовин у водних екосистемах

Назва речовини	Властивості, що визначають токсичність	Механізм біотрансформації	Екотоксикологічні ефекти
1	2	3	4
Тринітротолуол (уламки боеприпасів)	Мутагенні, канцерогенні, цитотоксичні та гепатотоксичні властивості. Особливо небезпечний через утворення ароматичних амінів у процесі розкладу	У водному середовищі утворює реактивні форми кисню шляхом редукції нітрогруп, які є більш токсичні та стійкі; викликає генотоксичність (мутації). Деградація уповільнена і може тривати роками	Для <i>іхтіофауни</i> : оксидативний стрес, пошкодження ДНК, ураження печінки, порушення дихання, зниження фертильності; для <i>планктону</i> : пригнічення фотосинтезу, зниження біомаси; для <i>фітопланктону і моллюсків</i> : зниження виживання, летальність; для <i>бентосу</i> : зміни морфологічних властивостей, накопичення в тканинах (Rosen & Lotufo (2007); Ek et al. (2005); ATSDR TNT Profile (2019))
Гексоген (вибухові речовини, розклад боеприпасів у воді)	Потужний нейротоксикант, який викликає судоми у риб і безхребетних. Характеризується високою міграційною здатністю – може потрапляти у підземні води	В анаеробних умовах формує дуже токсичні нейротоксини (моно-, ді- і тринітрозаміни сполуки). В аеробних умовах бактерії <i>Rhodococcus</i> sp. утворюють формальдегід і нітросполуки	Для <i>іхтіофауни</i> : порушення нервової діяльності, дихання, летальний токсикоз; для <i>зоопланктону</i> : порушення рухової активності, зниження виживаності; для <i>мікроорганізмів</i> : зміни метаболізму азоту та структури мікробного співтовариства; для <i>личинок риб, земноводних і безхребетних</i> – зниження росту та репродукції, підвищена летальність (Sunahara et al., <i>RDX Toxicology Review</i> (2009); EPA (2021))
Октоген (фрагменти вибухівки, вимивання з ґрунтів)	Хімічно стабільний і мало піддається природному розкладу, має кумулятивні ефекти	Анаеробне розкладання дуже повільне; основні продукти – токсичні нітросполуки; низька, але стабільна хронічна токсичність; може накопичуватися у донних відкладах	Для <i>іхтіофауни</i> : непрямі ефекти через харчовий ланцюг, накопичення в тканинах; для <i>фітопланктону</i> : зниження швидкості росту, пригнічення фотосинтезу; для <i>зоопланктону</i> : порушення життєвого циклу, збільшення смертності; накопичення у <i>бентосі</i> (Zhang et al. (2020); Talmage et al. (1999))
Сполуки азоту (продукти детонування вибухових пристроїв)	Підвищення концентрації амонію – викликає нейротоксичність; нітрат – викликає метгемоглобін і гіпоксію; Біогенні елементи, призводять до евтрофікації (інтенсивного розвитку сине-зелених водоростей)	Зниження і недостача кисню у воді; руйнування язбер,	Призводить до масової загибелі <i>риб від гіпоксії</i> ; для <i>амфібій</i> – порушення осморегуляції; для <i>планктону</i> – підвищена токсичність; для <i>водоростей</i> – втрата хлорофілу (Camargo & Alonso (2006); EPA Nitrogen Criteria (2018); WHO Nitrate Guidelines (2017))

1	2	3	4
Важкі метали (детонатори, корпуси снарядів тощо): свинець (Pb), ртуть (Hg), кадмій (Cd), мідь (Cu), цинк (Zn), хром (Cr)	Кумулятивні токсиканти. Солі важких металів розкладаються на йони з наступним утворенням гідроксидів, фосфатів, які накопичувались викликають дезфункції	Осідають у донних відкладеннях і мулу. Мають властивості накопичуватися в організмах (риб, моллюсків, ракоподібних), впливаючи на обмін речовин.	Для <i>іхтіофауни</i> : неврологічні та скелетні деформації; порушення функції нирок; порушення репродукції; для <i>фітопланктону, макрозообентосу, моллюсків, ракоподібних</i> : біоаккумуляція і висока чутливість, летальність, порушення осморегуляції (Singh et al., 2023; Ray et al., 2024; Gupta et al., 2019. Human Health Risks et al., 2024)
Нафтопродукти (паливо, мастила, технічна речина)	Утворення плівки на поверхні води, а з часом осідають на дно. Порушення мембранних структур (ліпофільна дія), інгібування ферментів; порушення клітинного дихання	Порушення газообмін водоїми, блокування світла, зменшення розчинного кисню. Ускладнюють процеси самоочищення водних об'єктів	Для <i>іхтіофауни</i> : порушують органи дихання, токсичні для ікри; для <i>фітопланктону</i> : викликають загибель внаслідок нестачі кисню і світла (Khan MAQ, 2005; Connell & Miller, 2010; Zhang et al., 2019)

тону, зменшення фотосинтетичних пігментів у воді і донних відкладах, зменшення чисельності зоопланктону і порушення трофічних ланцюгів; накопичення токсикантів у біоті, евтрофікація водного середовища; руйнування мікробіоти, яка відповідає за самоочищення поверхневих водних об'єктів.

Звичайно всі ці фактори впливають та впливатимуть на стан гідробіонтів. Токсична дія важких металів, етеророзчинених речовин деяких складних органічних сполук, порушує метаболічні процеси у гідробіонтів, що призводить до зниження продуктивності їхніх популяцій. Зміна хімічного складу води, особливо підвищення концентрації органічних речовин і сполук азоту, може призвести до зміни структури біопланктону та бентосу, що створює тенденцію до евтрофікації або витіснення чутливих видів більш стійкими.

У риб, що мешкають у зонах із підвищеним техногенним навантаженням (до яких тепер належить частина акваторії Сіверського Донця), зафіксовано зростання частоти деформацій скелета, інтерсексуальних форм та порушень розвитку ікри. Крім того, велика імовірність накопичення в організмах риб важких металів. Через забруднення, спричинене війною, рибні запаси Сіверського Дінця значно зменшилися. Раніше у річці водився 41 вид риб (дані Сіверсько-Донецького басейнового управління водних ресурсів).

Наявна інформація про руйнування, забруднення та деградацію водних екосистем має фрагментарний характер, тому для формування цілісної картини необхідні комплексні та довгострокові дослідження (можливих відтермінованих наслідків), які зможуть бути здійснені лише після стабілізації безпекової ситуації та припинення активних бойових дій.

**Висновки.** Водні екосистеми суббасейну Сіверського Дінця у районах воєнних дій, які спричинили фізичні, хімічні та біологічні порушення, стали з найбільш постраждалих. У поверхневій водні об'єкти надходять вибухові речовини, нафтопродукти, важкі метали, складні органічні сполуки, біогенні елементи та інші токсиканти, що викликають гостру і хронічну токсичність, біоаккумуляцію та руйнування трофічних зв'язків. Це веде до деградації аквабіоценозів, гальмування процесів самоочищення та уповільнення самовідновлення річкових систем. Але дослідження якості води на інших ділянках Сіверського Дінця показали відносно стабільну ситуацію з невеликим перевищенням нормативних показників по інтегральним показникам забруднення ХСК, БСК-5, а також сполукам азоту і фосфору (у місцях нижче скиду зворотних вод після очищення їх на очисних спорудах). Скороченню обсягів забруднених скидів сприяло зменшення антропогенного навантаження через відсутність підприємств. Проте велика кількість руйнованих або пошкоджених очисних споруд негативно впливає на якість воли і екологічний стан поверхневих водних об'єктів. Довгострокові наслідки залишаються невідомими та потребують системного моніторингу, який стане можливим лише після забезпечення безпеки досліджень.

**Перспективи використання результатів дослідження.** Практична значущість роботи полягає у можливості використання результатів для удосконалення системи екологічного моніторингу, оцінки екологічних ризиків і планування заходів післявоєнного відновлення водних ресурсів суббасейну Сіверського Дінця.

## Література

1. Gleick, P. H., Shimabuku, M. Water-related conflicts: definitions, data, and trends from the water conflict chronology. *Environmental Research Letters*. 2023. Vol. 18. № 3. DOI: 10.1088/1748-9326/acbb8f. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/acbb8f>.
2. Water Conflict Chronology. Pacific Institute. URL: <https://www.worldwater.org/water-conflict/>; Water Conflict Chronology: Fact Sheet. 2025. URL: [https://pacinst.org/wp-content/uploads/2025/11/Water-Conflict-Chronology\\_fact-sheet\\_2025\\_final.pdf](https://pacinst.org/wp-content/uploads/2025/11/Water-Conflict-Chronology_fact-sheet_2025_final.pdf) (дата звернення: 01.12.2025).
3. Гриценко А. В., Цапко Н. С., Маркіна Н. К., Мельников А. Ю. Екологічні і соціально-економічні наслідки вибуху нафтобази під час бомбардування м. Харкова, визначені за підтримки ЮНІСЕФ, рекомендації щодо їх подолання. *Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення*: зб. наук. ст. XXI Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Харків, 25–26 верес. 2025 р.). Харків: УКРНДІЕП, 2025. С. 12–24.
4. Angurets O., Khazan P., Kolesnikova K., Kushch M., Černochova M., Havránek M. Environmental consequences of Russian war in Ukraine. Prague, 2023. ISBN 978-80-88508-05-2. URL: <https://cleanair.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/cleanair.org.ua-environmental-consequences-of-russian-war-in-ukraine-war-damages-en-version.pdf> (дата звернення: 03.12.2025).
5. Impact of the Russian-Ukrainian armed conflict on water resources and water infrastructure. *Nature Sustainability*. 2023. Vol. 6, № 5. DOI: 10.1038/s41893-023-01068-x. URL: <https://www.researchgate.net/publication/368926198> (дата звернення: 08.12.2025).
6. Shibanova A., Ruda M., Paslawski M. Impact of active military actions on the ecological state of soil and water resources in southern Ukraine. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2025. Vol. 351. № 3.1. P. 579–584. DOI:10.31891/2307-5732-2025-351-75. URL: <https://www.researchgate.net/publication/396548927> (дата звернення: 11.12.2025).
7. Report on direct infrastructure damage from destruction as a result of Russia's military aggression against Ukraine as of early 2024. Kyiv, 2024. URL: [https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/04/01.01.24\\_Damages\\_Report.pdf](https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/04/01.01.24_Damages_Report.pdf) (дата звернення: 11.12.2025).
8. Афанасьев С. О. Вплив війни на гідроекосистеми України: підсумки першого року повномасштабного вторгнення (огляд). *Гідробіологічний журнал*. 2023. Т. 59. № 2. С. 3–19.
9. Екологічний злочин росіян: збитки від втрати води на Харківщині оцінили в мільярди. URL: <https://kharkiv.v.ua/ekologichni-zlochyn-rosiian-zbitki-vid-vtrati-vodi-na-harkivshini-ocinili-v-miliardi/> (дата звернення: 14.12.2025).
10. Інформації про підтоплення після пошкодження Печенізької дамби не надходило – гідрологія. *Сусільне Харків*. URL: <https://susilne.media/kharkiv/1183826-informacii-pro-pidtoplenna-pisla-poskodzenna-pecenizkoi-dambi-ne-nadhodilo-gidrologina/> (дата звернення: 14.12.2025).
11. Стан басейну Сіверського Донця та фактори впливу в умовах військових дій: техн. Звіт. Міністерство екології та природних ресурсів України; за підтримки ОБСЄ. Київ, 2018. URL: <https://www.osce.org/sites/default/files/f/documents/8/a/419462.pdf> (дата звернення: 15.12.2025).
12. Lunova O., Yermakov V., Petry R., Lubenska N. Impact of the long-time armed conflicts on the ecological safety of industrial objects. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2022. Vol. 31. № 2. P. 380–389. DOI: 10.15421/112235.
13. Доповідь про стан навколишнього природного середовища в Харківській області у 2023 році. Харків, 2024. URL: [https://kharkivoda.gov.ua/content/documents/1285/128411/Attaches/regionalna\\_dopovid\\_2023\\_harkiv.pdf](https://kharkivoda.gov.ua/content/documents/1285/128411/Attaches/regionalna_dopovid_2023_harkiv.pdf) (дата звернення: 13.12.2025).
14. Kulyk M., Lisnyak A. A. Assessment of surface water quality in the Siverskyi Donets River within Kharkiv region in 2023. *Man and Environment. Issues of Neoeology*. 2024. DOI: 10.26565/1992-4224-2024-41-06. URL: <https://www.researchgate.net/publication/382160770> (дата звернення: 12.12.2025).
15. Звіт про стратегічну екологічну оцінку проекту Плану управління річковим басейном Дону (2025–2030). Київ : НВП «УКРЕКОПРОЕКТ», 2024. URL: [https://davr.gov.ua/fls18/pl24/DON\\_SEO.pdf](https://davr.gov.ua/fls18/pl24/DON_SEO.pdf) (дата звернення: 15.12.2025).
16. Мельник А. П., Власова Н. М., Колос О. М., Діденко О. В. Видові особливості розподілу та накопичення важких металів в організмах риб-бентофагів Кременчуцького водосховища. *Рибогосподарська наука України*. 2013. № 1. С. 25–30.
17. Ray S., Vashishth R. From Water to Plate: Reviewing the Bioaccumulation of Heavy Metals in Fish and Unraveling Human Health Risks in the Food Chain. *Emerging Contaminants*. 2024. Vol. 10. № 4. Art. 100358. DOI: 10.1016/j.emcon.2024.100358. URL: <https://www.researchgate.net/publication/380412223> (дата звернення: 16.12.2025).
18. Гончаров Г. Л., Новіцький Р. О., Гапіч Г. В. Попередня оцінка втрат для рибного господарства Харківської області внаслідок воєнних дій. *Fisheries Science of Ukraine*. 2024. № 1. С. 4–25. DOI: 10.61976/fsu2024.01.004.

Дата першого надходження статті до видання: 12.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026

УДК 574.64:504.064

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.1-64.7>

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТОКСИКСИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДИ РІЧКИ УДИ У МЕЖАХ М. ХАРКОВА

Крайнюков О.М., Кривицька І.А.

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна  
майд. Свободи, 4, 61022, м. Харків  
[alkraynukov@gmail.com](mailto:alkraynukov@gmail.com)

У роботі представлено результати еколого-токсикологічної оцінки якості води річки Уди в межах міста Харкова на основі сезонного моніторингу та біотестування з використанням *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg. Дослідження виконувалися навесні, влітку та восени 2025 року у чотирьох створах, що охоплюють ключові ділянки річки, включно з зонами впливу Жовтневого водосховища та місцем впадіння р. Лопань. Наведено аналіз природних та антропогенних факторів, які формують екологічний стан водотоку, зокрема вплив сільськогосподарського стоку, побутових і промислових забруднень, транспорту, а також особливостей урбанізованої частини басейну.

За результатами біотестування встановлено наявність хронічної токсичності у всіх досліджених зразках. Навесні спостерігали погіршення якості води, що зумовлено таненням снігу, активним поверхневим зливом і низькою інтенсивністю самоочищення. У літній період відмічено покращення показників завдяки підвищенню температури, активізації фотосинтезу, збільшенню мікробіологічної деструкції та зниженню обсягів стоку. Восени якість води знову зменшувалася через уповільнення біохімічних процесів, зниження концентрації розчиненого кисню, надходження органічних і техногенних забруднень з поверхневим стоком.

Класифікація якості води за токсикологічними показниками показала, що у створах у межах Жовтневого водосховища та в місці впадіння Лопані води належать переважно до 2 класу (слабко забруднені), тоді як нижче за течією фіксувався 3 клас – помірно забруднена вода. Річка характеризується високою чутливістю до антропогенних навантажень і обмеженим потенціалом самоочищення в умовах урбанізованого впливу. Отримані результати підтверджують необхідність регулярного еколого-токсикологічного моніторингу та інтеграції біотестування у систему оцінки якості поверхневих вод для своєчасного виявлення екологічних загроз і підвищення ефективності природоохоронних заходів. *Ключові слова:* забруднення вод, токсичні властивості води, тест-об'єкт, біологічний моніторинг, біотестування.

### Study of the toxic properties of the Udy river water within the city of Kharkiv. Krainiukov O., Kryvytska I.

This study presents the results of an ecotoxicological assessment of water quality in the Udy River within the city of Kharkiv, based on seasonal monitoring and chronic toxicity testing using *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg. Water samples were collected in spring, summer, and autumn of 2025 at four monitoring stations representing key hydrological sections, including the inflow and outflow zones of the Zhovtneve Reservoir and the confluence with the Lopan River. The study analyzes the combined influence of natural and anthropogenic factors determining the chemical and biological status of the river, with particular emphasis on agricultural runoff, domestic and industrial pollution, and inputs from urbanized catchment areas.

Chronic toxicity was detected in all examined samples. In spring, water quality deteriorated due to snowmelt, intensive surface runoff enriched with mineral and organic pollutants, and reduced microbial activity caused by low temperatures. During summer, water quality improved, driven by enhanced photosynthetic activity, elevated temperatures that stimulate microbial degradation of organic substances, higher dissolved oxygen concentrations, and reduced runoff. In autumn, water quality declined again as a result of lower temperatures, reduced photosynthesis, decreased oxygen levels, and increased inflow of organic matter, nutrients, petroleum products, and heavy metals during rainfall events.

According to toxicological classification, water quality in the upper river sections and around the Zhovtneve Reservoir was predominantly assessed as Class 2 (slightly polluted), while downstream sections near the Lopan confluence showed Class 3 characteristics (moderately polluted). The Udy River demonstrates high sensitivity to anthropogenic pressures and limited self-purification capacity under conditions of urban influence. The findings underscore the importance of continuous ecotoxicological monitoring and the integration of bioassays into surface-water quality assessment systems to identify ecological risks promptly and improve the effectiveness of environmental protection measures. *Key words:* water pollution, toxic properties of water, test object, biological monitoring, biotesting.

**Постановка проблеми.** Забруднення поверхневих водних об'єктів є критичною та нагальною глобальною проблемою, яка потребує повсякденної уваги. Поверхневі води відіграють вирішальну роль у підтримці та збереженні життя на Землі, але, на жаль, досі ми маємо менше розуміння їх просторової

та часової динаміки скидів та накопичень на глобальному рівні. Забруднення поверхневих вод відбувається з різних джерел, які класифікуються на точкові та неточкові. Точкові джерела – це специфічні, ідентифіковані джерела забруднення, які викидають забруднюючі речовини безпосередньо у водойми



через труби або канали, що дозволяє легше їх ідентифікувати та керувати ними, наприклад, промислові скиди, очисні споруди та звалища. Однак неточкові джерела походять від широко розповсюдженої діяльності на великих територіях та створюють проблеми через свою дифузну природу та численні шляхи забруднення, наприклад, сільськогосподарські стоки, міські зливові стоки та атмосферні осадки. Надмірне накопичення важких металів, стійких органічних забруднювачів, пестицидів, побічних продуктів хлорування, фармацевтичної продукції у поверхневих водах різними шляхами загрожує якості та безпеці харчових продуктів. Як наслідок, існує нагальна потреба в розробці та проектуванні нових інструментів для ідентифікації та кількісної оцінки різних забруднювачів навколишнього середовища. У цьому контексті біологічні сенсори постають як необхідні пристрої, що добре підходять для різних екологічних застосувань.

**Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.** Авторський доробок має чітко виражений міждисциплінарний та прикладний характер, поєднуючи фундаментальні наукові дослідження з практичними завданнями екологічної безпеки. Він спрямований на вирішення актуальних проблем оцінки якості поверхневих вод, мінімізації екологічних ризиків та забезпечення сталого розвитку урбанізованих територій. Проведені дослідження токсичних властивостей поверхневих вод річки Уди в межах м. Харкова спрямовані на вирішення однієї з ключових екологічних проблем сучасності – оцінки реального впливу антропогенного забруднення на водні екосистеми.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Важкі метали, що потрапляють у поверхневі води внаслідок різної соціально-економічної діяльності, можуть створювати небезпечні властивості тривалий час. Їхні екотоксичні, канцерогенні та біоаккумулятивні властивості, навіть у слідових кількостях, можуть серйозно погіршити регіональну екологічну ситуацію [1]. Основні зареєстровані наслідки включають зниження врожайності сільськогосподарських культур, порушення безпеки харчових продуктів, зниження здатності води до самоочищення та негативний вплив на здоров'я рослин, тварин і людей [2]. У дослідженні [3] підкреслюють, що токсичні метали, такі як кадмій (Cd), ртуть (Hg), мідь (Cu), миш'як (As), хром (Cr) та свинець (Pb), потрапляють у водні системи як промислові побічні продукти, спричиняючи серйозні проблеми зі здоров'ям, включаючи пошкодження мозку та нирок. Хоча річки є основними шляхами руху води, насиченої важкими металами, внутрішні водойми, такі як канали та стоки стічних вод, також сприяють забрудненню, особливо в сільських районах, де переважає агропромислова діяльність [4]. Ці джерела поверхневих вод залежать від сезонних гідрологічних процесів, що створює труднощі для точного вимірювання мобіль-

ності важких металів у польових умовах. Мінливість річкового стоку, інтенсивність атмосферних опадів, коливання ґрунтових вод та взаємодія поверхневих і ґрунтових вод – це лише деякі з факторів, що впливають на польові вимірювання показників якості води [5]. Наприклад, під час інтенсивних мусонних опадів раптове збільшення річкового стоку викликає швидку мобілізацію розчинених важких металів і тимчасово розбавляє їх концентрації в поверхневих водах. Тому розуміння динаміки важких металів під регіональними гідрологічними впливами є важливим для постійного моніторингу та ефективного управління впливом на навколишнє середовище.

У світі багато річкових басейнів зазнали інтенсивного забруднення важкими металами, що дає цінну інформацію про гідродинаміку цих забруднювачів. Наприклад, басейн річки Янцзи в Китаї зіткнувся із забрудненням важкими металами через швидку індустріалізацію та урбанізацію [6]. Аналогічно, басейн річки Міссісіпі у Сполучених Штатах постраждав від промислових скидів [7]. У Європі, басейн річки Дунай потерпає від забруднення важкими металами, що впливає на якість води [8]. В Індії річкові басейни, такі як Ямуна, Маханаді, Брахмані та Дамодар, сильно забруднені через промислові скиди, неочищені стічні води та гірничодобувну промисловість [9]. Більшість цих досліджень зосереджені на дослідженні якості поверхневих вод навколо міських районів. Басейн річки Хіндона, частина басейну річки Ганг, є прикладом агроекосистеми, де спостерігається суттєве забруднення поверхневих вод важкими металами (Fe, Mn, Cu, Ni, Zn, Cr, Pb, Cd та Co) [10]. У дослідженні [11] наголошено до термінового втручання уряду для зменшення ризику забруднення в регіоні після аналізу впливу важких металів на воду, осадові породи, ґрунти та зразки рослин. Однак зусилля щодо пом'якшення наслідків будуть ефективними лише за умови глибокого розуміння гідродинамічного процесу, який регулює рухливості забруднюючих речовин.

Гідрологічні моделі виявилися важливими для оцінки компонентів водного балансу та прогнозування руху забруднюючих речовин у річкових басейнах. Незважаючи на досягнення, залишаються проблеми з точним вимірюванням та прогнозуванням річкових потоків на частих перетинах, особливо в регіонах з обмеженими даними та басейнах без вимірювань, таких як басейн Хіндона, який є частиною класифікованої мережі річкових басейнів Індії [12].

Основними джерелами нових забруднювачів є побутові скиди, стічні води лікарень, промислові стічні води, стічні води від сільського господарства, тваринництва та аквакультури, а також фільтрати зі звалищ. Зокрема, стічні води з міських очисних споруд є основними факторами, що сприяють присутності нових забруднювачів у водах. Хоча багато хімічних речовин нещодавно були регульовані як при-

оритетні небезпечні речовини, звичайні установки для очищення стічних вод та питної води не були розроблені для видалення більшості нових забруднювачів. Прикладами є стійкі органічні забруднювачі, такі як поліхлоровані біфеніли, дибензофурані та полібромовані дифенілові ефіри, в озерних та океанічних екосистемах Китаю; нові забруднювачі, такі як алкілфеноли, природні та синтетичні естрогени, антибіотики та антидепресанти, у португальських річках [13], а також фармацевтичні препарати, гормони, косметика, засоби особистої гігієни та пестициди у водах Мексики, Бразилії та Колумбії [14-16]. Усі континенти страждають від цих забруднювачів. Тому дослідження якості води водних об'єктів є вкрай актуальною проблемою.

У світовому масштабі присутність забруднювачів антропогенного походження у водному середовищі добре задокументована [17-19]. З огляду на десятки тисяч забруднювачів, що використовуються сьогодні (плюс продукти їх перетворення), важко кількісно оцінити потенційний вплив на здоров'я людини внаслідок впливу на навколишнє середовище. Однак багато забруднювачів навколишнього середовища є відомими або підозрюваними ендокринними руйнівниками та/або мають такі наслідки для здоров'я, як підвищений ризик раку, порушення метаболізму або інші сублетальні наслідки [20]. Відповідно до рекомендацій Закону про безпечну питну воду Агентства з охорони навколишнього середовища США [21], очищення питної води та моніторинг дотримання вимог проводяться для забезпечення доступності безпечної питної води для населення. Однак моніторинг зазвичай зосереджений на регульованих забруднювачах (наприклад, нітратах, миш'яку) і не встигає за виробництвом інших забруднювачів [22]. Наразі існує обмежена кількість даних про поширеність, масштаби та токсикологію нерегульованих забруднювачів, а також фактори (гідрогеологічні, гідрологічні, очищення тощо), пов'язані з впливом та ризиком у питній воді [23].

У Сполучених Штатах (США) як підземні, так і поверхневі води використовуються як джерела питної води, і більшість штатів здійснюють прямий контроль за своїми системами водопостачання громад. Антропогенна діяльність на ландшафті впливає на якість як підземних, так і поверхневих водних ресурсів, що використовуються як питна вода, хоча профіль ризику для кожного ресурсу може відрізнятися [23, 24]. На якість поверхневих вод часто безпосередньо впливають скиди з очисних споруд, лікарень та промислових об'єктів [25]. Оскільки методи очищення не розроблені для видалення забруднюючих речовин, таких як фармацевтичні препарати, засоби особистої гігієни, поверхнево-активні речовини та антипірени, вони часто потрапляють у водотоки-приймачі [26, 27]. Крім того, неточкові джерела забруднюючих речовин, такі як стічні води з місь-

ких та/або сільськогосподарських районів, можуть вносити пестициди та інші забруднюючі речовини, що накопичилися на поверхні землі, у водотоки-приймачі [28-30]. Хоча ґрунтові води можуть бути певною мірою захищені від антропогенної діяльності на ландшафті, забруднювачі можуть потрапляти до ґрунтових вод через фільтрати зі звалищ, септичні стічні води та інші методи інфільтрації [31-34], що призводить до подібних профілів забруднювачів, як і в поверхневих водах. Враховуючи ці різноманітні джерела потенційного забруднення поверхневих і ґрунтових вод, важливо розуміти, як кожне з них впливає на них і які наслідки це має для постачання питної води.

У контексті України особливої актуальності набуває проблема дослідження стану водних об'єктів у регіонах із високим антропогенним навантаженням. До таких належить і річка Уди, яка має важливе господарське та екологічне значення для міста Харків. Її якісний стан безпосередньо впливає на біологічне благополуччя водних екосистем і здоров'я населення. Вивчення токсикологічних властивостей води річки Уди за допомогою біотестування на ракоподібних дає можливість оцінити рівень антропогенного навантаження та виявити потенційні ризики для екосистеми та людини.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** Незважаючи на значну кількість наукових досліджень, присвячених оцінці якості поверхневих вод, проблема комплексної еколого-токсикологічної оцінки водних об'єктів урбанізованих територій залишається недостатньо вирішеною. Більшість існуючих робіт зосереджена переважно на аналізі окремих гідрохімічних показників та порівнянні їх із гранично допустимими концентраціями, що не завжди дозволяє адекватно оцінити реальний біологічний вплив сумішей забруднювальних речовин на водні екосистеми.

Недостатньо вивченими залишаються питання інтегральної оцінки токсичності поверхневих вод, яка враховує сумарну та кумулятивну дію різних за походженням і механізмами впливу токсикантів. Зокрема, у науковій літературі обмежено представлено дослідження, спрямовані на поєднання традиційного хімічного аналізу з методами біотестування як інструменту виявлення прихованої токсичності водного середовища.

Саме зазначені невирішені аспекти – інтегральна оцінка токсичності, аналіз сумарної дії забруднювачів, вивчення сезонної мінливості токсичних властивостей води та застосування біотестування для урбанізованих водних об'єктів – і зумовили вибір напряму дослідження, представленого в означеній статті.

**Новизна.** Наукова новизна означеної статті полягає в отриманні нових еколого-токсикологічних даних щодо стану поверхневих вод урбанізованої

території на основі застосування методів біотестування. Уперше для умов досліджуваної ділянки річки проведено інтегральну оцінку токсичних властивостей води, яка дозволяє врахувати сумарну дію комплексу забруднювальних речовин, незалежно від їх хімічної природи та механізмів впливу.

Отримані результати розширюють наукові уявлення про еколого-токсикологічну характеристику поверхневих вод урбанізованих територій та створюють наукове підґрунтя для удосконалення системи екологічного моніторингу з урахуванням біологічних критеріїв якості води.

**Методологічне або загальнонаукове значення.** Методологічне або загальнонаукове значення дослідження полягає в обґрунтуванні доцільності комплексного підходу до оцінки якості поверхневих вод, який поєднує традиційні гідрохімічні методи з еколого-токсикологічним біотестуванням, що дозволяє враховувати сумарну та кумулятивну дію забруднювальних речовин і отримувати інтегральну оцінку біологічного ефекту їх впливу на водні екосистеми, розширюючи наукові підходи екологічного моніторингу та управління екологічними ризиками.

**Викладення основного матеріалу.** Річка Уди бере свій початок на Середньоруській височині, у балці поблизу села Безсонівка Белгородської області (РФ) на висоті близько 190 метрів над рівнем моря. На територію України, в межі Харківської області, річка входить північно-східніше села Окоп і впадає в річку Сіверський Донець на відстані 825 км від її витoku. Загальна довжина Уд становить 164 км, з яких 127 км протікають по території Харківської області. Площа водозбірного басейну сягає 3894 км<sup>2</sup>, у тому числі 3460 км<sup>2</sup> в межах області.

Серед основних джерел антропогенного впливу особливу роль відіграють **стічні води міських очисних споруд – Диканівського та Безлюдівського комплексів.** У зонах їхнього впливу зафіксовано пікові відхилення від типових гідрохімічних показників, що свідчить про періодичне перевищення гранично допустимих концентрацій окремих забруднювачів. У цілому стан вод у цій частині річки оцінюється як **«слабко забруднений»**, тобто близький до задовільного.

Якість води річки Уди формується під впливом поєднання природних та антропогенних факторів, що визначають хімічний склад і гідробіологічний стан водотоку. Аналіз гідрохімічних показників свідчить, що у воді переважають **гідрокарбонатно-кальцієві та сульфатно-гідрокарбонатні типи мінералізації**, характерні для річок Лісостепової зони України.

У дослідженні для визначення хронічної токсичності води з річки Уди було застосовано методику біотестування на ракоподібних *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg. Методика ґрунтується на порівнянні показників виживаності та/або плодючості церіо-

дафній у зразках досліджуваної води (експеримент) і у воді, в якій вони утримуються в нормальних умовах культивування (контроль).

Показником наявності хронічної токсичності води вважається статистично достовірне зниження рівня виживаності або плодючості церіодафній у досліджуваному зразку порівняно з контрольним протягом усього періоду біотестування [35].

Експериментальні дослідження виконувалися в лабораторії еколого-токсикологічних досліджень навчально-наукового інституту екології, зеленої енергетики та сталого розвитку Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

Відбір зразків поверхневих вод з річки Уди було здійснено навесні, влітку та восени 2025 року. Метою досліджень було визначення токсичних властивостей зразків води з річки Уди у межах м. Харків.

Зразки відбирались у 4 створах з р. Уди:

1. р. Уди, впадіння до Жовтневого водосховища, 49.963724, 36.147223;
2. р. Уди, витік з Жовтневого водосховища, (гребля) 49.957958, 36.164751;
3. р. Уди, до впадіння р. Лопань, 49.941275, 36.206614;
4. р. Лопань, після впадіння р. Лопань (міст по вул. Свистунівської), 49.934878, 36.204232

Аналіз отриманих результатів показав, що токсичні властивості визначено у всіх зразках поверхневих вод, які було відібрано з р. Уди у створах впадіння та витік з Жовтневого водосховища, до та після впадіння р. Лопань. У створах впадіння та витік з Жовтневого водосховища та до впадіння р. Лопань було визначено 2 клас якості води – вода слабозабруднена, а в створі р. Уди, після впадіння р. Лопань 3 клас якості води – вода помірно забруднена. Спостережувану динаміку токсичних властивостей можна пояснити комплексним впливом урбанізованого басейну, з території якого у річку Уди надходить поверхневий стік, збагачений побутовими, транспортними та промисловими забрудненнями. Це зумовлює зростання концентрації токсичних сполук та погіршення якості водного середовища.

Влітку 2025 року було проведено другий етап досліджень, відповідно до яких було отримано наступні результати – токсичні властивості було визначено у всіх чотирьох створах дослідження. У створах впадіння та витік з Жовтневого водосховища та до і після впадіння р. Лопань до р. Уди було визначено 2 клас якості води – вода слабко забруднена.

Покращення якості води в р. Уди у літній сезон може бути зумовлене комплексом природних та біологічних факторів, що сприяють активізації процесів самоочищення водного середовища.

По-перше – інтенсифікація фотосинтезу та біологічної продукції.

По-друге – підвищення швидкості біохімічних процесів.

По-третє – інтенсифікація газообміну.

По-четверте – седиментаційні процеси.

В умовах уповільненого течії влітку активізується осадження завислих часток і сполук важких металів на дно, що тимчасово покращує гідрохімічні показники у поверхневих шарах води.

Восени 2025 року відбір зразків з р. Уди було здійснено у жовтні. У зразках поверхневих вод, які було відібрано з р. Уди, а саме у створах впадіння та витік з Жовтневого водосховища було визначено 2 клас якості води – вода слабозабруднена. У створах р. Уди, після і до впадіння р. Лопань 3 клас якості води – вода помірно забруднена.

У осінній період якість води у більшості річкових екосистем погіршується внаслідок зниження температури, уповільнення біохімічних процесів та збільшення надходження органічних речовин із водозбору, саме така ситуація склалася і з якістю води р. Уди. Основні фактори погіршення якості води наступні: охолодження водного середовища призводить до сповільнення метаболічної активності мікроорганізмів, що беруть участь у процесах біодеструкції органічних сполук. Це, своєю чергою, зменшує ефективність природного самоочищення. Через зниження інтенсивності фотосинтезу у фітопланктоні зменшується виділення розчиненого кисню, а при розкладанні опалого листя, детриту та донних відкладень спостерігається підвищене споживання кисню. Як наслідок – збільшується біохімічне споживання кисню (БСК) і погіршується окисно-відновний потенціал. Осінні дощі змивають із сільськогосподарських угідь і урбанізованих територій органічні залишки, біогенні елементи, нафтопродукти та важкі метали, що підвищує рівень забруд-

нення. Під час дощових періодів відбувається ерозія берегів і донних відкладень, що підвищує мутність води й знижує її прозорість, утруднюючи фотосинтетичні процеси. Через зменшення температури та освітленості уповільнюється розвиток фітопланктону і водоростей, які відіграють ключову роль у підтриманні кисневого балансу.

Загальна тенденція у динаміці якості води р. Уди і взагалі річкових систем наступна: весна – максимальне навантаження на водну систему, погіршення показників; літо – відносна стабілізація та покращення якості за рахунок біологічної активності; осінь – повторне зростання забрудненості через гідрометеорологічні та біохімічні чинники.

**Головні висновки.** Узагальнюючи отримані результати моніторингових досліджень зразків води, які було відібрано у різні пори року з р. Уди можна зробити наступні висновки, навесні у більшості річок спостерігається погіршення якості води, що пов'язано з: таненням снігу та льоду, внаслідок чого у водотоки надходить великий обсяг поверхневого стоку, насиченого мінеральними та органічними забруднювачами (добрива, побутові відходи, нафтопродукти); змиванням ґрунтів та добрив із сільськогосподарських угідь, що спричиняє евтрофікацію (збагачення біогенними елементами, переважно азотом і фосфором); низькою температурою води, яка обмежує активність мікроорганізмів-деструкторів, тому самоочищення відбувається повільно.

У цей період часто фіксують зростання мутності, підвищення БСК, зниження прозорості та загальну нестабільність гідрохімічних показників.

У літній період якість води покращується завдяки:

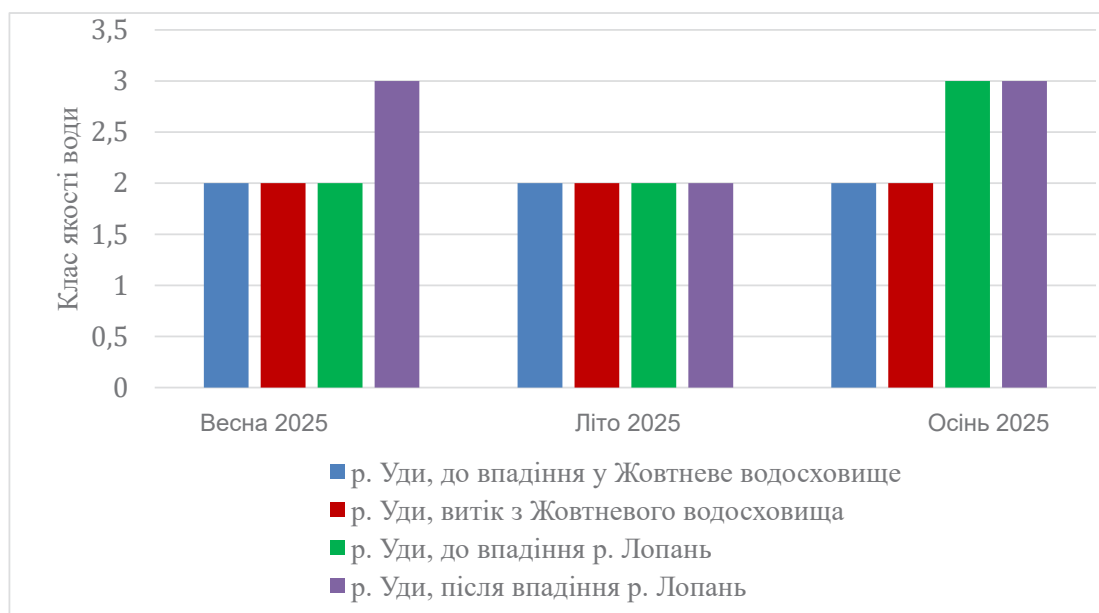


Рис. 1. Узагальнення результату визначення токсичних властивостей зразків поверхневих вод, які було відібрано з р. Уди у різні пори року

- активізації фотосинтезу у фітопланктоні та макрофітах, що підвищує концентрацію розчиненого кисню;

- зростанню температури, яка стимулює мікробіологічні процеси розкладання органічних речовин;

- зменшенню стоку з території водозбору (в суху погоду) та відповідно меншому надходженню забруднень.

Разом із тим, у маловодні роки можливе підвищення концентрації токсикантів через зниження об'єму води, тому позитивний ефект має умовний і сезонний характер.

Восени відбувається поступове погіршення якості води через:

- зниження температури, що уповільнює біохімічні процеси;

- зменшення фотосинтетичної активності, а отже – зниження вмісту розчиненого кисню;

- інтенсивний поверхневий змив під час дощів, який приносить органічні залишки, листя, гумусові сполуки, важкі метали;

- підвищення мутності та БСК, що свідчить про послаблення природного самоочищення.

**Перспективи використання результатів дослідження.** Перспективи використання результатів дослідження полягають у можливості їх застосування в системі державного та регіонального екологічного моніторингу поверхневих вод, для удосконалення методів оцінки екологічного стану водних об'єктів урбанізованих територій, обґрунтування природоохоронних заходів та прийняття управлінських рішень у сфері охорони довкілля, а також у навчальному процесі під час підготовки фахівців екологічного профілю та подальших наукових дослідженнях, спрямованих на оцінку екологічних ризиків і сталий розвиток водних екосистем.

### Література

1. Singh J., Yadav B.K. Adsorption of Heavy Metal with Aged Microplastic in Groundwater Under Varying Organic Matter Content. *In Ground Water Contamination in India: Adverse Effects on Habitats, Springer Nature Switzerland, Cham*, 2024, pp. 3-10.
2. Meng F., Cao R., Zhu X., Zhang Y., Liu M., Wang J., Geng N. A nationwide investigation on the characteristics and health risk of trace elements in surface water across China. *Water Res.*, 2024, 250, p. 121076. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.121076>
3. Selvam S., Jesuraja K., Roy P.D., Venkatramanan S., Khan R., Shukla S., Muthukumar P. Human health risk assessment of heavy metal and pathogenic contamination in surface water of the Punnakayal estuary, South India. *Chemosphere*, 2022, 298, p. 134027. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134027>
4. Singh J., Yadav B.K., Krause S. Spatiotemporal distribution and ecological hazards of microplastic pollution in soil water resources around a wastewater treatment plant and municipal solid waste site. *J. Contam. Hydrol.*, 2025, p. 104515. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2025.104515>
5. Marques E.A., Junior G.C.S., Eger G.Z., Ilambwetsi A.M., Raphael P., Generoso T.N., Júnior J.N. Analysis of groundwater and river stage fluctuations and their relationship with water use and climate variation effects on Alto Grande watershed, Northeastern Brazil. *J. South Am. Earth Sci.*, 2020, 103, p. 102723. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102723>
6. Zhang K., Chang S., Tu X., Wang E., Yu Y., Liu J., Fu Q. Heavy metals in centralized drinking water sources of the J River: A comprehensive study from a basin-wide perspective. *J. Hazard. Mater.*, 2024, 469, p. 133936 <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133936>
7. Reiman J.H., Xu Y.J., He S., DelDuco E.M. Metals geochemistry and mass export from the Mississippi-Atchafalaya River system to the Northern Gulf of Mexico. *Chemosphere*, 2018, 205, pp. 559-569. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.094>
8. Pavlović P., Mitrović M., Đorđević D., Sakan S., Slobodnik J., Liška I., Paunović M. Assessment of the contamination of riparian soil and vegetation by trace metals – A Danube River case study. *Sci. Total Environ.*, 2016, 540, pp. 396-409. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.125>
9. Singh J., Yadav B.K., Schneidewind U., Krause S. Microplastics pollution in inland aquatic ecosystems of India with a global perspective on sources, composition, and spatial distribution. *J. Hydrol.: Reg. Stud.*, 2024, 53, p. 101798. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101798>
10. Sharma R., Kumar A., Singh N., Sharma K. Impact of seasonal variation on water quality of Hindon River: Physicochemical and biological analysis. *SN Appl. Sci.*, 2021, 3 (1) pp. 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.vlsi.2021.03.001>
11. Jain C.K., Sharma M.K. Heavy metal transport in the Hindon river basin, India. *Environ. Monit. Assess.*, 2006, 112, pp. 255-270.
12. Visakh S., Raju P.V., Kulkarni S.S., Diwakar P.G. Inter-comparison of water balance components of river basins draining into selected delta districts of Eastern India. *Sci. Total Environ.*, 2019, 654, pp. 1258-1269. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.162>
13. Barbosa M. O., Ribeiro A. R., Ratola N., Hain E., Homem V., Pereira M. F. R., Blaney L., Silva A. M. T. Spatial and seasonal occurrence of micropollutants in four Portuguese rivers and a case study for fluorescence excitation-emission matrices. *Sci Total Environ.*, 2018, 644, pp. 1128–1140. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.355>
14. Arguello-Pérez M. A., Mendoza-Pérez J. A., Tintos-Gómez A., Ramírez-Ayala E., Godínez-Domínguez E., Silva-Bátiz F. A. Ecotoxicological analysis of emerging contaminants from wastewater discharges in the coastal zone of Cihuatlán (Jalisco, Mexico). *Water*, 2019, 11, p. 1386. <https://doi.org/10.3390/w11071386>
15. Bedoya-Ríos D.F., Lara-Borrero J.A., Duke-Pardo V., Wood-Parra C.A., Jimenez E.M., Toro A.F. Study of the occurrence and ecosystem danger of selected endocrine disruptors in the urban water cycle of the city of Bogotá, Colombia. *J Env Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng.*, 2018, 53, pp. 317–325. <https://doi.org/10.1080/10934529.2017.1401372>
16. Barbosa A.M.C., de Solano M.L.M., de Umbuzeiro G.A. Pesticides in drinking water–The Brazilian monitoring program. *Front Public Health*, 2015, 3, p. 246. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2015.00246>

17. Bunting S., Lapwort D., Crane E., Grima-Olmedo J., Koroša A., Kuczyńska A., Mali N., Rosenqvist L., van Vliet M., Togola A. Emerging organic compounds in European groundwater. *Environ. Pollut.* 2021, 269, p. 115945. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115945>
18. Reberski J.L., Terzić J., Maurice, L.D., Lapworth D.J. Emerging organic contaminants in karst groundwater: A global level assessment. *J. Hydrol.* 2022, 604, p. 127242. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127242>
19. Mukhopadhyay A., Duttagupta S., Mukherjee A. Emerging organic contaminants in global community drinking water sources and supply: A review of occurrence, processes and remediation. *J. Environ. Chem. Eng.* 2022, 10, p. 107560. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107560>
20. Pereira L.C., de Souza A.O., Bernardes M.F.F., Pazin M., Tasso M.J., Pereira P.H., Dorta D.J. A perspective on the potential risks of emerging contaminants to human and environmental health. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2015, 22, pp. 13800–13823. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4896-6>
21. United States Congress. Safe Drinking Water Act; United States Congress: Washington, DC, USA, 1974.
22. Rosenblum J.S., Liethen A., Miller-Robbie L. Prioritization and risk ranking of regulated and unregulated chemicals in US drinking water. *Environ. Sci. Technol.* 2024, 58, pp. 6878–6889. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c08745>
23. Levin R., Villanueva C.M., Beene D., Cradock A.L., Donat-Vargas C., Lewis J., Martinez-Morata I., Minovi D., Nigra A.E. Olson E.D. US drinking water quality; exposure risk profiles for seven legacy and emerging contaminants. *J. Expo. Sci. Env. Epid.* 2023, 34, pp. 3–22. <https://doi.org/10.1038/s41370-023-00597-z>
24. Bradley P.M., Journey C.A., Romanok K.M., Barber L.B., Buxton H.T., Foreman W.T., Furlong E.T., Glassmeyer S.T., Hladik M.L., Iwanowicz L.R. Expanded target-chemical analysis reveals extensive mixed-organic-contaminant exposure in U.S. Streams. *Environ. Sci. Technol.* 2017, 51, pp. 4792–4802. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00012>
25. Glassmeyer S.T., Furlong E.T., Kolpin D.W., Batt A.L., Benson R., Boone J.S., Conerly O., Donohue M.J., King D.N., Kostich M.S. Nationwide reconnaissance of contaminants of emerging concern in source and treated drinking waters of the United States. *Sci. Total Environ.* 2017, pp. 581–582, 909–922. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.004>
26. Singh P.K., Kumar U., Kumar I., Dwivedi A., Singh P., Mishra S., Seth C.S., Sharma R.K. Critical review on toxic contaminants in surface water ecosystem: Sources, monitoring, and its impact on human health. *Environ. Sci. Pollut. R.* 2024, 31, pp. 56428–56462. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34932-0>
27. Bai X., Lutz A., Carroll R., Keteles K., Dahlin K., Murphy M., Nguyen D. Occurrence, distribution, and seasonality of emerging contaminants in urban watersheds. *Chemosphere.* 2018, 200, pp. 133–142. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.02.106>
28. Morin-Crini N., Lichtfouse E., Liu G., Balaram V., Ribeiro A.R.L., Lu Z., Stock F., Carmona E., Teixeira M.R., Picos-Corrales, L.A. Worldwide cases of water pollution by emerging contaminants: A review. *Environ. Chem. Lett.* 2022, 20, pp. 2311–2338. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01447-4>
29. Tran N. H., Li J., Hu J., Ong S.L. Occurrence and suitability of pharmaceuticals and personal care products as molecular markers for raw wastewater contamination in surface water and groundwater. *Environ. Sci. Pollut. R.* 2014, 21, pp. 4727–4740. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2428-9>
30. Masoner J.R., Kolpin D.W., Cozzarelli I.M., Barber L.B., Burden D.S., Foreman W.T., Forshay K.J., Furlong E.T., Groves J.F., Hladik M.L. Urban stormwater: An overlooked pathway of extensive mixed contaminants to surface and groundwaters in the United States. *Environ. Sci. Technol.*, 2019, 53, pp. 10070–10081. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02867>
31. Santos V.S., Anjos J.S.X., de Medeiros J.F., Montagner C.C. Impact of agricultural runoff and domestic sewage discharge on the spatial-temporal occurrence of emerging contaminants in an urban stream in São Paulo, Brazil. *Environ. Monit. Assess.*, 2022, 194, p. 637. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10288-1>
32. Masoner J.R., Kolpin D.W., Furlong E.T., Cozzarelli I.M., Gray J.L. Landfill leachate as a mirror of today's disposable society: Pharmaceuticals and other contaminants of emerging concern in final leachate from landfills in the conterminous United States. *Environ. Toxicol., Chem.* 2016, 35, pp. 906–918. <https://doi.org/10.1002/etc.3219>
33. Yang Y.-Y., Toor G.S., Wilson P.C., Williams C.F. Micropollutants in groundwater from septic systems: Transformations, transport mechanisms, and human health risk assessment. *Water Res.*, 2017, 123, pp. 258–267. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.06.054>
34. Pinasseau L., Wiest J., Volatier L., Mermillod-Blondin F., Vuillet E. Emerging polar pollutants in groundwater: Potential impact of urban stormwater infiltration practices. *Environ. Pollut.*, 2020, 266, p. 115387. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115387>
35. ДСТУ 4174:2003 Якість води. Визначення хронічної токсичності хімічних речовин та води на *Daphnia magna* Straus та *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg (Cladocera, Crustacea) (ISO 10706:2000, MOD). Київ: Держспоживстандарт України, 2004.

Дата першого надходження статті до видання: 07.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026

УДК 343.32.1.

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.1-64.8>

## ІХТІОФАУНА РІЧКИ ІКВА (У МЕЖАХ МІСТА КРЕМЕНЦЯ) ЯК ІНДИКАТОР ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ВОДНОЇ ЕКОСИСТЕМИ ТА ПОТЕНЦІЙНИХ РИЗИКІВ ДЛЯ ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ

Кратко О.В., Головатюк Л.М., Барабаш Ю.В.

Кременецька обласна гуманітарно-педагогічна академія ім. Тараса Шевченка  
вул. Ліцейна, 1, 47002, м. Кременець  
kratkoolya@gmail.com, liudmylam1@ukr.net, barabah@gmail.com

У статті представлено комплексне дослідження іхтіофауни річки Іква в межах міста Кременця як чутливого біоіндикатора екологічного стану водної екосистеми та пов'язаних із ним ризиків для здоров'я людини. Проаналізовано вплив сукупності антропогенних чинників, зокрема сільськогосподарського і побутового забруднення, меліоративних заходів та трансформації русла, на формування видового складу та чисельності риб. Виявлено чіткі ознаки деградації водного середовища, що проявляються у домінуванні екологічно пластичних видів (карась сріблястий *Carassius gibelio*) та скороченні популяцій чутливих стенобіонтів. Обґрунтовано використання іхтіофауни разом із супутніми групами зообентосу (трубочник *Tubifex tubifex*, личинки *Chironomus spp.*) та зоопланктону як інтегрального біоіндикатора хімічного, органічного та санітарного стану води.

У роботі детально розглянуто механізми впливу деградованої водної екосистеми на здоров'я населення. Основними шляхами визначено трофічний – через біоаккумуляцію токсичних речовин (важкі метали, пестициди) у тканинах риб та споживання такої риби, і контактний – через рекреаційне або господарське використання забрудненої води. Окрему увагу приділено паразитологічним ризикам, зумовленим створенням сприятливих умов для розвитку проміжних хазяїв гельмінтів у зв'язку з евтрофікацією та органічним забрудненням. На прикладі аварійного забруднення русла аміаком у 2024 році показана вразливість екосистеми до техногенних впливів та їх негативні наслідки для біорізноманіття.

Результати дослідження підкреслюють доцільність включення моніторингу іхтіофауни та супутніх індикаторних видів у регіональні системи оцінки екологічної безпеки водних ресурсів. Отримані дані мають практичну цінність для розробки природоохоронних заходів, рибогосподарського регулювання, екологічної освіти та мінімізації ризиків для здоров'я населення, пов'язаних із якістю водних біоресурсів і станом малих річок. **Ключові слова:** іхтіофауна, річка Іква, біоіндикація, екологічний стан, антропогенний вплив, здоров'я людини, екологічні ризики, евтрофікація, біоаккумуляція.

**The ichthyofauna of the ikva river (within the city of Kremenets) as an indicator of the ecological state of the aquatic ecosystem and potential risks to human health. Kratko O., Holovatiuk L., Barabash Yu.**

The article presents a comprehensive study of the ichthyofauna of the Ikva River within the city of Kremenets as a sensitive bioindicator of the ecological state of the aquatic ecosystem and related risks to human health. The influence of a combination of anthropogenic factors, in particular agricultural and domestic pollution, land reclamation measures, and riverbed transformation, on the formation of fish species composition and abundance is analyzed. Clear signs of water environment degradation were found, manifested in the dominance of ecologically plastic species (silver crucian carp *Carassius gibelio*) and a reduction in the populations of sensitive stenobionts. The use of ichthyofauna together with associated groups of zoobenthos (*Tubifex tubifex*, *Chironomus spp.* larvae) and zooplankton as an integral bioindicator of the chemical, organic, and sanitary status of water has been substantiated.

The paper examines in detail the mechanisms of the degraded aquatic ecosystem's impact on public health. The main pathways identified are trophic – through the bioaccumulation of toxic substances (heavy metals, pesticides) in fish tissues and the consumption of such fish, and contact – through recreational or economic use of contaminated water. Particular attention is paid to parasitological risks caused by the creation of favorable conditions for the development of intermediate hosts of helminths in connection with eutrophication and organic pollution. The example of accidental ammonia contamination of the riverbed in 2024 demonstrates the vulnerability of the ecosystem to anthropogenic influences and their negative consequences for biodiversity.

The results of the study emphasize the advisability of including monitoring of ichthyofauna and associated indicator species in regional systems for assessing the environmental safety of water resources. The data obtained are of practical value for the development of nature conservation measures, fisheries management, environmental education, and minimization of risks to public health associated with the quality of aquatic biological resources and the condition of small rivers. **Key words:** ichthyofauna, Ikva River, bioindication, ecological status, anthropogenic impact, human health, environmental risks, eutrophication, bioaccumulation.

**Постановка проблеми.** Водні екосистеми річок України є важливими компонентами біосфери, що забезпечують підтримання екологічної рівноваги, збереження біорізноманіття та формування при-

родних ресурсів, необхідних для життєдіяльності людини. Особливе значення у цьому контексті мають малі та середні річки, які, попри свої розміри, виконують ключову роль у функціонуванні регіональних



екосистем і є осередками існування численних видів гідробіонтів, зокрема риб [2].

Річка Іква – ліва притока річки Стир – протікає територією західних областей України, зокрема в межах міста Кременця, та зазнає суттєвого антропогенного навантаження. Порушення гідрологічного режиму, забруднення води побутовими й сільськогосподарськими стоками, меліораційні заходи та техногенні впливи призводять до трансформації водної екосистеми та змін у структурі іхтіофауни. Такі зміни відображають погіршення екологічного стану водотоку і можуть слугувати індикатором потенційних санітарно-гігієнічних ризиків для здоров'я людини, пов'язаних із якістю води та використанням водних біоресурсів. У сучасних умовах проблема накопичення промислових та комунальних відходів є однією з найбільших небезпек для екології України [2].

**Актуальність дослідження.** Зростання техногенного навантаження на річки України призводить до деградації водних екосистем, порушення їх природної рівноваги і зменшення видового різноманіття риб. Відомий факт, що іхтіофауна є чутливим біоіндикатором якості води й загального екологічного стану водних екосистем, а саме зміни її видового складу та чисельності відображають рівень антропогенного впливу. Стан іхтіофауни опосередковано впливає на здоров'я людини через харчові ланцюги, споживання риби та використання водних ресурсів для побутових і рекреаційних потреб [1].

Особливої уваги потребують локальні водотоки, що інтенсивно використовуються населенням для рибальства, рекреації та господарської діяльності. До таких належить річка Іква в межах Кременецького району, екологічний стан якої безпосередньо пов'язаний із якістю життя населення та потенційними ризиками для здоров'я людини. Відповідно, дослідження окресленої проблематики є важливим етапом на шляху збалансування інтересів сучасного людства з процесами забезпечення належного стану навколишнього природного середовища [1].

**Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.** Дослідження відповідає сучасним напрямкам екологічного моніторингу, охорони водних біоресурсів, раціонального природокористування та забезпечення екологічної безпеки населення. Отримані результати можуть бути використані у природоохоронній діяльності, рибогосподарській практиці, екологічній освіті та при розробці регіональних програм охорони малих і середніх річок.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У наукових працях українських і зарубіжних дослідників іхтіофауна розглядається як індикатор екологічного стану водойм, особливо в умовах евтрофікації, органічного забруднення та регулювання русел. Встановлено, що домінування екологічно пластичних видів (*Carassius gibelio*, *Rutilus rutilus*) та змен-

шення чисельності стенобіонтів є ознакою деградації водних екосистем [1; 6]. Разом із тим, регіональні дослідження річки Іква мають фрагментарний характер і потребують систематизації та оновлення.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** Недостатньо дослідженими залишаються питання просторового поширення видів риб у межах Кременецького району, вплив локальних джерел забруднення на структуру іхтіоценозів та можливі наслідки змін іхтіофауни для здоров'я населення.

**Новизна.** Новизна роботи полягає у: комплексній оцінці сучасного стану іхтіофауни річки Іква; аналізі біоіндикаторних видів гідробіонтів; виявленні локальних осередків деградації водної екосистеми; обґрунтуванні зв'язку між станом іхтіофауни та екологічною безпекою людини.

**Методологічне та загальнонаукове значення.** Робота ґрунтується на принципах системного екологічного аналізу, біоіндикації та порівняльно-екологічного підходу, що дозволяє використовувати отримані результати для подальших моніторингових досліджень.

**Викладення основного матеріалу.** Кліматичні умови Тернопільської області, зокрема Кременецького району, характеризуються помірно континентальним кліматом із чітко вираженою сезонністю. Це зумовлює динамічні зміни гідрологічного режиму річки Іква: коливання рівня води, швидкості течії, процеси замерзання і скресання, вплив опадів та посух. Річка Іква зазнає значного антропогенного навантаження, основними джерелами якого є: сільськогосподарський стік; побутові та неочищені стічні води; меліоративні та гідротехнічні споруди; засмічення побутовими відходами. Загальний екологічний стан річки можна оцінити як задовільний із локальними зонами погіршення. Про це свідчить скорочення чисельності чутливих видів риб, зменшення біорізноманіття та поява біоіндикаторів органічного забруднення [3].

У замулених ділянках річки (с. Великі Бережці) зафіксовано масове поширення трубочника (*Tubifex tubifex*) та личинок комарів-дергунів (*Chironomus spp.*), що є індикаторами низького вмісту кисню та високої концентрації органічних речовин.

Серед моллюсків переважають стійкі до евтрофікації види – *Lymnaea stagnalis* та *Physa fontinalis*, які витісняють більш чутливі форми. В іхтіофауні домінує карась сріблястий (*Carassius gibelio*), що свідчить про екологічну трансформацію водойми. Він вважається екологічно пластичним видом. Даний вид здатний витримувати кисневий дефіцит і вночі високий вміст органіки, каламутність води. Незважаючи на перераховані недоліки водойми цей вид здатен домінувати у водних екосистемах, де інші види зникають або зменшуються у чисельності [4].

Ще одним із індикатором погіршення екологічних умов, за нашими власними спостереженнями є масове розмноження зоопланктону, особливо коло-

верток (*Rotifera*) та дафній (*Daphnia spp.*). Відомо, що їх чисельність різко може зростати внаслідок евтрофікації води, через надлишок біогенних речовин, таких як нітрати, фосфати у результаті сільськогосподарського стоку, про що згадувалося вище [6].

У таблиці 1 подана інформація, на основі власних спостережень, щодо наявності біоіндикаторів у водах річки Ікви. Здійснений аналіз щодо видів та типів забруднення про наявність яких свідчать види зооіндикатори.

У таблиці 2 подано інформацію щодо поширення видового різноманіття представників іхтіофауни. Так як у межах Кременецького району річка Іква проходить поблизу міста Кременець та низки сіл навколо міста, включаючи Іква, Сапанів, Великі Бережці та Малі Бережці. Вказані села розташовані близько до річки, що підтверджується їх географічними координатами і прибережної інфраструктури. Наприклад, село Іква знаходиться на відстані приблизно 2,5 км від села Малі Бережці і приблизно 3 км від села Сапанова, що свідчить про їх розташування вздовж течії річки Іква [5].

Зазначений видовий склад відображає типову іхтіофауну середніх річок Західної України. Проте, хочемо зазначити, що антропогенний та техногенний впливи, зокрема забруднення у руслі річки та зміна її гідрологічного режиму, можуть призводити до необоротних змін у видовому складі чим знизити чисельності риб. Наприклад, у 2024 році внаслідок аварії із викидом аміаку у русло річки Іква спостерігалася масова гибель риби, що негативно вплинуло на біорізноманіття водойми та знизило якість води [6].

Відомий факт, що іхтіофауна річкових екосистем може розглядатися не лише як показник екологічного стану водотоку, але й як непрямий індикатор потенційних ризиків для здоров'я людини. Зміни у видовому складі, чисельності та структурі іхтіоценозів часто відображають наявність хімічного, органічного або мікробіологічного забруднення води, що має важливе санітарно-гігієнічне значення.

Домінування екологічно пластичних видів риб, зокрема карася сріблястого (*Carassius gibelio*), та зменшення чисельності чутливих стенобіонтних

видів свідчать про погіршення якості води, зокрема зниження концентрації розчиненого кисню, підвищення вмісту органічних речовин і біогенних елементів. Такі умови є сприятливими для накопичення токсичних сполук і розвитку патогенних мікроорганізмів [3].

Вода – важлива складова функціонування нашого організму, найбільш важливий та необхідний компонент для всіх форм життя [3]. Одним із важливих механізмів впливу забруднених водних екосистем на здоров'я людини є трофічний шлях. Риби, як кінцева ланка багатьох водних харчових ланцюгів, здатні акумулювати у тканинах важкі метали, пестициди, нафтопродукти та інші токсиканти. Споживання такої риби може становити потенційну небезпеку для населення, особливо у разі регулярного несанкціонованого вилову та використання рибних ресурсів для харчових потреб.

Іншим шляхом впливу є контакт людини з водою річки під час рекреаційного використання або господарської діяльності. Погіршення санітарного стану води, підтвержене масовим розвитком індикаторних організмів органічного забруднення (трубочник *Tubifex tubifex*, личинки *Chironomus spp.*), може свідчити про підвищений ризик бактеріального та паразитарного забруднення води.

Фізико-хімічні показники води, такі як підвищена каламутність, вміст амонійних сполук, нітратів і фосфатів, а також періодичні випадки техногенного забруднення (зокрема аварійні викиди), є додатковими факторами, що посилюють негативний вплив на іхтіофауну та опосередковано на здоров'я людини.

Також важливим компонентом оцінки екологічного стану водної екосистеми та потенційних ризиків для здоров'я людини є паразитологічний аналіз іхтіофауни. Риби, що мешкають у водоймах із підвищеним антропогенним навантаженням, часто виступають проміжними або остаточними хазяями паразитів, життєві цикли яких тісно пов'язані з якістю водного середовища.

Погіршення гідрохімічних і санітарних показників води, зростання органічного забруднення та евтрофікація сприяють масовому розвитку проміжних хазяїв паразитів – моллюсків і донних безхребет-

Таблиця 1

## Зооіндикатори у річці Іква

Група тварин	Види-індикатори	Що свідчить про забруднення
Донні безхребетні	<i>Tubifex tubifex</i> (трубочник), <i>Chironomus spp.</i>	Переважають у забруднених, замулених ділянках з низьким вмістом кисню
Моллюски	<i>Physa fontinalis</i> , <i>Lymnaea stagnalis</i>	Стійкі до органічного забруднення, витісняють чутливіші види
Риби	<i>Carassius gibelio</i> (карась сріблястий)	Добре пристосований до кисневого дефіциту, часто домінує у бідних водоймах
Планктон (зоопланктон)	Масове розмноження <i>Rotifera</i> , <i>Daphnia spp.</i>	Ознака евтрофікації, зростання біомаси через надлишок поживних речовин

Схема поширення видів риб у річці Іква у межах Кременецького району

	Типові види риб	Екологічні умови	Особливості
Село Іква	Карась сріблястий ( <i>Carassius gibelio</i> ), плітка ( <i>Rutilus rutilus</i> ), окунь ( <i>Perca fluviatilis</i> ), щука ( <i>Esox lucius</i> )	Помірна течія, присутність прибережної рослинності, вплив антропогенної діяльності та сільськогосподарських стоків	Вплив аграрної діяльності, ймовірне зниження якості води через добрива та пестициди
Село Сапанів	Карась сріблястий ( <i>Carassius gibelio</i> ), плітка ( <i>Rutilus rutilus</i> ), Верховодка звичайна ( <i>Alburnus alburnus</i> ), щука ( <i>Esox lucius</i> ), Лящ звичайний ( <i>Abramis brama</i> )	Помірна течія, присутність прибережної рослинності, вплив антропогенної діяльності та сільськогосподарських стоків	Вплив аграрної діяльності, ймовірне зниження якості води через добрива та пестициди
Село Великі Бережці	Карась сріблястий ( <i>Carassius gibelio</i> ), плітка ( <i>Rutilus rutilus</i> ), окунь ( <i>Perca fluviatilis</i> ), щука ( <i>Esox lucius</i> )	Помірна течія, присутність прибережної рослинності, вплив антропогенної діяльності та сільськогосподарських стоків	Вплив аграрної діяльності, ймовірне зниження якості води через добрива та пестициди
Село Малі Бережці	Карась сріблястий ( <i>Carassius gibelio</i> ), плітка ( <i>Rutilus rutilus</i> ), окунь ( <i>Perca fluviatilis</i> ), Верховодка звичайна ( <i>Alburnus alburnus</i> )	Помірна течія, присутність прибережної рослинності, вплив антропогенної діяльності та сільськогосподарських стоків	Вплив аграрної діяльності, ймовірне зниження якості води через добрива та пестициди

них. Виявлене у річці Іква домінування таких організмів, як *Lymnaea stagnalis*, *Physa fontinalis*, *Tubifex tubifex* та личинок *Chironomus spp.*, створює сприятливі умови для циркуляції збудників гельмінтозів та протозойних інвазій у риб [2].

Деякі види риб можуть бути носіями паразитів, потенційно небезпечних для людини, особливо у разі споживання недостатньо термічно обробленої риби або контакту з інвазованою водою. Таким чином, порушення структури іхтіоценозів та зростання чисельності еврибіонтних видів може свідчити не лише про деградацію водної екосистеми, але й про підвищення паразитологічних ризиків для населення.

Риби річки Іква можуть виступати біоаккумуляторами хімічних забруднювачів, зокрема важких металів, залишків агрохімікатів, сполук азоту та фосфору. Умови органічного забруднення та періодичні техногенні викиди, зафіксовані в межах міста Кременця, підвищують ймовірність накопичення токсичних речовин у тканинах риб.

Регулярне споживання риби з водойм, екологічний стан яких є нестабільним, може становити потенційний харчовий ризик для людини. Особливо це стосується несанкціонованого любительського рибальства, яке не супроводжується санітарним контролем якості виловленої риби.

У зв'язку з цим іхтіофауна річки Іква може розглядатися як важливий елемент системи екологічного моніторингу, що дозволяє опосередковано оцінювати безпечність використання водних біоре-

сурсів та відповідність екологічного стану водойми чинним санітарно-гігієнічним нормам [2].

**Головні висновки.** Іхтіофауна річки Іква зазнає суттєвих змін під впливом антропогенних факторів. Домінування екологічно пластичних видів і зменшення чисельності стенобіонтів є ознакою деградації екосистеми. Стан іхтіофауни може розглядатися як індикатор екологічних ризиків для здоров'я людини.

Отже, стан іхтіофауни річки Іква може розглядатися як інтегральний показник екологічної безпеки водної екосистеми та відповідності її параметрів екологічним і санітарно-гігієнічним нормам. Регулярний моніторинг видового складу риб та супутніх гідробіонтів є важливим інструментом раннього виявлення екологічних загроз і мінімізації потенційних ризиків для здоров'я населення [5].

**Перспективи використання результатів дослідження.**

Результати дослідження відкривають перспективи для впровадження локальної системи біоіндикаційного моніторингу, розробки заходів з реабілітації екосистеми річки, оцінки екологічних ризиків для здоров'я населення (зокрема через біоаккумуляцію токсикантів у рибі та паразитологічну небезпеку), а також можуть бути використані в екологічній освіті, подальших наукових працях (токсикологічний, паразитологічний аналіз) та для обґрунтування управлінських рішень щодо охорони водних ресурсів регіону.

## Література

1. Кратко О.В., Мунтян Л.Я., Демчук Л.І. Екологічна безпека України в контексті сталого розвитку. К.: Редакція науково-практичного журналу «Екологічні науки», Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління Міністерства екології та природних ресурсів України «Екологічні науки» № 34. С. 219-225.
2. Кратко О.В. Екологізація сучасного виробництва. Подільські читання: Всеукраїнська науково-практична конференція (Кременець, 12-13 жовтня 2017 року). Кременець: ВЦ КОГПА ім. Тараса Шевченка, 2017. С. 89-91.
3. Головатюк Л.М., Бондар О.Б., Кратко О. Небезпека та наслідки забруднення водойм для організму людини. Екологічні науки: науково-практичний журнал. Київ: Видавничий дім «Гельветика», 5 (50), 2023. С. 174-179.
4. Кратко Ольга Вікторівна, Кратко Сергій Володимирович. Вплив воєнних дій на навколишнє природне середовище України. V Міжнародна науково практична конференція «Prospects of modern science and education», 07-10 лютого 2023 р., Стокгольм, Швеція. С. 63-67.
5. Гонтарук, М. В., та ін. Екологічний стан річки Іква Кременецького району Тернопільської області. [Електронний ресурс] / М. В. Гонтарук, Г. Б. Гуменюк, В. О. Хоменчук та ін. – DSpace TNPU. 2024. С. 123-129.
6. Тернопільська ОВА. Звіт про стратегічну екологічну оцінку проекту Програми соціально-економічного та культурного розвитку Тернопільської області (характеристика стану водних об'єктів та здоров'я населення). 2025. С. 45-78.

Дата першого надходження статті до видання: 26.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026

## ПРИРОДООРІЄНТОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ВІД НІТРОГЕНВІСНИХ СПОЛУК З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНИХ ВОДНО-БОЛОТНИХ УГІДЬ У БАСЕЙНІ Р. ПІВДЕННИЙ БУГ

Мандебура В.С.<sup>1</sup>, Латуша Д.Р.<sup>2</sup>, Кватернюк С.М.<sup>2</sup>, Петрук В.Г.<sup>2</sup>, Шевченко В.О.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини,  
вул. Садова, 2, 20300, м. Умань

<sup>2</sup>Вінницький національний технічний університет  
вул. Хмельницьке шосе, 95, 21021, м. Вінниця

У статті обґрунтовано впровадження природоорієнтованих рішень для очищення стічних вод та відновлення гідрологічного режиму в басейні річки Південний Буг. Проаналізовано сучасний гідрохімічний стан річки, який характеризується значним антропогенним тиском з боку комунальних підприємств та сільського господарства, що призводить до значного перевищення ГДК за сполуками азоту. Високий вміст органічних речовин та нітрогенвісних сполук призводить до дефіциту кисню та інтенсивної евтрофікації річкових екосистем. Запропоновано технологічну схему гібридної системи штучних водно-болотних угідь, що поєднує вертикальні та горизонтальні підповерхневі потоки для забезпечення повного циклу нітрифікації та денітрифікації. Визначено оптимальні біоагенти для фіторемедіації: полікультуру очерету (*Phragmites australis*) і рогозу (*Typha*) для основного етапу очищення та ряску малу (*Lemna minor*) для фінального доочищення, що дозволяє досягти ефективності видалення азоту та фосфору до 97%. Крім того, використано спеціалізовані реактивні субстрати для селективної адсорбції амонію та хімічного осадження сполук фосфору, що дозволяє підтримувати стабільно високу якість очищення навіть у періоди сезонного зниження температури. За допомогою математичного моделювання доведено, що впровадження ШВБУ забезпечує аугментацію базового стоку малих річок через прямий скид очищених вод та інфільтрацію в ґрунтові горизонти, що збільшує водність у межений період на 18%. Розроблене програмне забезпечення дозволяє адаптувати параметри очисних споруд до конкретних гідрологічних умов, що робить технологію ефективним інструментом для сталого управління водними ресурсами малих громад. Запропонована технологія є економічно вигідною та екологічно безпечною альтернативою традиційним методам очищення, що сприяє досягненню «доброго» екологічного стану водних ресурсів регіону. *Ключові слова*: штучні водно-болотні угіддя, природоорієнтовані рішення, нітрогенвісні сполуки, фіторемедіація, аугментація стоку, гібридні системи очищення, екологічна безпека, забруднення, антропогенний вплив.

**Nature-based technologies for wastewater treatment from nitrogen-containing compounds using artificial wetlands in the Southern Bug River basin. Mandebura V., Latusha D., Kvaterniuk S., Petruk V., Shevchenko V.**

The article substantiates the implementation of nature-based solutions for wastewater treatment and the restoration of the hydrological regime within the Southern Bug River basin. The study analyzes the current hydrochemical state of the river, which is characterized by significant anthropogenic pressure from municipal utilities and agriculture, leading to substantial excursions above the Maximum Permissible Concentrations (MPC) for nitrogen compounds. High concentrations of organic matter and nitrogen-bearing compounds result in oxygen depletion and intensive eutrophication of river ecosystems. A technological design for a hybrid constructed wetland system is proposed, integrating vertical and horizontal subsurface flows to ensure a complete nitrification-denitrification cycle. Optimal bioagents for phytoremediation were identified: a polyculture of common reed (*Phragmites australis*) and cattail (*Typha*) for the primary treatment stage, and common duckweed (*Lemna minor*) for final polishing. This configuration achieves nitrogen and phosphorus removal efficiencies of up to 97%. Furthermore, specialized reactive substrates are utilized for the selective adsorption of ammonium and chemical precipitation of phosphorus, maintaining consistently high treatment performance even during seasonal temperature decreases. Through mathematical modeling, it is demonstrated that the implementation of constructed wetlands ensures the augmentation of baseflow in small rivers via direct discharge of treated effluent and infiltration into groundwater aquifers, increasing water discharge during low-flow periods by 18%. The developed software allows for the adaptation of treatment plant parameters to specific hydrological conditions, establishing this technology as an effective tool for the sustainable water management of small communities. The proposed technology represents a cost-effective and environmentally sound alternative to conventional treatment methods, contributing to the achievement of “good” ecological status for the region’s water resources. *Key words*: constructed wetlands, nature-based solutions, nitrogen-containing compounds, phytoremediation, streamflow augmentation, hybrid treatment systems, environmental safety, pollution, anthropogenic impact.

**Постановка проблеми та актуальність дослідження.** Басейн річки Південний Буг є однією з ключових гідрологічних систем України, що забезпечує водними ресурсами значну частину Вінницької області та суміжних регіонів. Проте сучасний екологічний стан річки та її приток викликає занепо-



коєння через значне антропогенне навантаження. Основними джерелами забруднення є комунальні підприємства, сільське господарство та промисловість [1]. Моніторинг якості води фіксує систематичне перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) по розчиненому кисню, органічних речовинах (ХСК, БСК) та, що особливо критично, по нітрогенвмісних сполуках (азот амонійний, нітрити, нітрати) [1]. Надходження цих біогенних елементів у водні екосистеми спричиняє процес евтрофікації, порушує кисневий режим та призводить до деградації біорізноманіття.

Ситуація ускладнюється змінами клімату та масовим осушенням природних водно-болотних угідь у минулому столітті, що призвело до зниження водності малих річок та втрати їхньої здатності до самоочищення. Традиційні очисні споруди часто є застарілими, енергоємними та економічно обтяжливими для малих громад. У цьому контексті світова практика, зокрема країн Європейського Союзу, орієнтується на впровадження природоорієнтованих рішень (Nature-based Solutions – NbS) [2].

Використання штучних водно-болотних угідь (ШВБУ) або біоплато є перспективним напрямом для децентралізованого очищення стічних вод. Такі системи поєднують фізичні, хімічні та біологічні процеси (зокрема фітореMediaцію вищими водними рослинами) для ефективного видалення забрудників. Гібридні системи ШВБУ, що комбінують вертикальні та горизонтальні потоки, здатні забезпечити високу ефективність нітрифікації та денітрифікації, що є критичним для видалення азоту. Враховуючи необхідність імплементації Водної рамкової директиви ЄС та досягнення «доброго» екологічного стану водних масивів, розробка та адаптація технологій ШВБУ для умов басейну Південного Бугу є надзвичайно актуальним науково-практичним завданням.

**Мета роботи** полягає в обґрунтуванні та розробці природоорієнтованої технології очищення стічних вод від нітрогенвмісних сполук та відновлення гідрологічного режиму малих річок басейну Південного Бугу шляхом впровадження штучних водно-болотних угідь.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні **завдання**:

- проаналізувати сучасний гідрохімічний стан річки Південний Буг та структуру джерел забруднення в межах досліджуваного регіону, з акцентом на баланс біогенних елементів (азоту та фосфору);

- дослідити ефективність фітореMediaції різними видами вищих водних рослин (зокрема, *Phragmites australis*, *Typha*, *Lemna minor*) та обґрунтувати вибір біоагентів для видалення іонів амонію, нітратів та нітритів зі стічних вод;

- розробити технологічну схему гібридної системи штучних водно-болотних угідь, що поєднує зони з вертикальним та горизонтальним потоком для

забезпечення процесів нітрифікації-денітрифікації, а також підібрати оптимальні фільтруючі субстрати;

- створити математичну модель роботи очисного комплексу для визначення необхідної площі ШВБУ та прогнозування динаміки зниження концентрацій забруднюючих речовин;

- оцінити вплив запропонованої технології на відновлення водності малих річок через механізми аугментації базового стоку та поповнення ґрунтових вод очищеними стоками.

**Для досягнення мети дослідження використано такі методи:** системний аналіз та узагальнення наукового досвіду щодо проектування гібридних штучних водно-болотних угідь; аналіз даних моніторингу гідрохімічного стану басейну Південного Бугу для ідентифікації ключових чинників антропогенного навантаження; критичний огляд сучасних світових тенденцій у розвитку природоорієнтованих рішень та фітореMediaційних технологій; аналітичне моделювання кінетики процесів нітрифікації-денітрифікації за допомогою математичного апарату для розрахунку проектних параметрів очисних споруд; а також гідрологічне прогнозування на основі методу водного балансу для оцінки потенціалу аугментації базового стоку малих річок та поповнення ґрунтових вод.

**Виклад основного матеріалу.** Басейн річки Південний Буг у межах Вінницької області займає близько 62% її території (16400 км<sup>2</sup>) та зазнає значного антропогенного тиску, зумовленого давнім господарським освоєнням, високою розораністю земель та урбанізацією [1]. Водні ресурси річки інтенсивно використовуються для промислового, комунального водопостачання, зрошення та енергетики. Основними водоспоживачами в регіоні є КП «Вінницяоблводоканал» (21–26% від загального обсягу), підприємства енергетики (15–18%) та агропромисловий комплекс (зокрема, птахівництво – 4–5%).

Аналіз скидів стічних вод свідчить про домінування точкових джерел забруднення комунального походження. За даними 2018 року, у поверхневі водні об'єкти області було скинуто 65,55 млн. м<sup>3</sup> стічних вод, з яких 0,988 млн. м<sup>3</sup> класифікуються, як забруднені (недостатньо очищені або неочищені). Структурно основним джерелом забруднених стоків є комунальне господарство, на яке припадає 99% від загального обсягу таких скидів, тоді як на промисловість – лише 1%. Ключовими забруднювачами, що формують гідрохімічний режим річки, є водоканали міст області, а також агропромислові об'єкти та підприємства харчової промисловості [1].

Сучасний гідрохімічний стан річки Південний Буг характеризується критичним порушенням балансу біогенних елементів, що є головним чинником евтрофікації водойм. Моніторинг якості води фіксує систематичні перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) за сполуками азоту та органічними речовинами:

Ситуація з азотним забрудненням є загрозою. Зафіксовано перевищення ГДК по нітратах ( $NO_3^-$ ) у 22,4 раза, по нітриах ( $NO_2^-$ ) – у 18,3 раза, та по амонійному азоту – у 4,5 раза. У абсолютному вимірі річний обсяг надходження цих сполук зі стічними водами становить: нітратів – 499 т, амонійного азоту – 51 т, нітритів – 42 т.

Річне надходження фосфатів у водні об'єкти регіону оцінюється у 42,54 т. Хоча сполуки фосфору часто є лімітуючим фактором «цвітіння» води і такі обсяги скидів створюють передумови для інтенсивного розвитку синьо-зелених водоростей.

Високий вміст органіки підтверджується перевищенням нормативів за показниками БСК повне (біохімічне споживання кисню) у 2,5 раза та ХСК (хімічне споживання кисню) у 2,4 раза. Це призводить до дефіциту кисню у воді, концентрація якого перевищує допустимі норми відхилення у 2,2 раза.

Окрім біогенних елементів, у річковій воді фіксуються значні концентрації специфічних забруднювачів: сульфатів (перевищення ГДК у 11,9 раза), хлоридів (у 8 разів), нафтопродуктів (у 6 разів) та важких металів (мідь – у 50 разів, марганець – у 10 разів). Значний внесок у забруднення роблять дифузні джерела, зокрема сільськогосподарські угіддя. Змив мінеральних добрив призводить до насичення водонесних горизонтів нітратами, що підтверджується моніторингом води у шахтних криницях, де вміст нітратів перевищує норми на 40–52 % проб у різних районах області.

Аналіз показує, що існуючі системи очищення стічних вод, особливо комунальні, не забезпечують належного видалення нітрогенвмісних та фосфорвмісних сполук. Питома вага проб води, що не відповідають санітарно-хімічним нормам у джерелі водопостачання (р. Південний Буг), сягає 93%. Це зумовлює нагальну необхідність впровадження природоорієнтованих технологій, таких як штучні водно-болотні угіддя, здатних ефективно видаляти біогенні елементи та відновлювати екологічний потенціал річкового басейну.

Фіторемедіація базується на здатності вищих водних рослин (ВВР) вилучати, трансформувати та акумулювати забруднюючі речовини з водного середовища [10]. У контексті очищення стічних вод ВВР виконують кілька ключових функцій: фільтраційну (осадження завислих часток), поглинальну (абсорбція біогенних елементів), накопичувальну (металів та стійкої органіки) та окислювальну (збагачення води киснем через фотосинтез) [3]. Крім того, коренева система рослин створює сприятливе середовище (ризосферу) для розвитку мікроорганізмів, які забезпечують процеси нітрифікації та мінералізації органічних речовин [4].

Для умов басейну річки Південний Буг, з урахуванням кліматичних особливостей та складу стічних вод, найбільш перспективними є такі види макрофітів:

– очерет звичайний (*Phragmites australis*) вважається найбільш ефективним для основних стадій очищення, особливо у системах з підповерхневим потоком. Очерет формує розвинену кореневу систему, що проникає глибоко у субстрат, забезпечуючи киснем аеробні зони, необхідні для окислення амонію, та стабілізує фільтруючий шар [3, 5]. Він також демонструє високу стійкість до токсичних впливів та здатність до видалення фенолів та ПАВ.

– рогіз (*Typha latifolia*, *Typha angustifolia*) ефективний у системах біоплато завдяки своїй потужній біомасі та здатності до акумуляції важких металів у кореневій системі, що запобігає їх повторному виходу у воду. У комбінації з очеретом, рогіз сприяє створенню різноманітних мікрозон (аеробних та анаеробних), що є критичним для проходження повного циклу перетворення азоту: від амоніфікації до денітрифікації [6].

– ряска мала (*Lemna minor*) демонструє виняткову ефективність на етапі глибокого доочищення води від розчинених сполук азоту та фосфору. Асиміляційний потенціал ряски за азотом становить 2,4 гN/(кг·доб). Експериментальні дані підтверджують ефективність видалення іонів амонію ( $NH_4^+NO_3^-$ ) на рівні 97,3%, що перевищує показники інших занурених рослин. Ряска здатна видаляти до 96,7% фосфатів зі стічних вод, що робить її незамінною для запобігання евтрофікації. Потенціал поглинання нітратів ( $NO_3^-$ ) складає 0,34 г/(кг·доб). Важливою умовою використання ряски є регулярне вилучення біомаси, що дозволяє фізично видаляти забруднення з екосистеми та запобігати вторинному забрудненню.

Враховуючи необхідність досягнення нормативів ГДК по нітрогенвмісних сполуках, доцільним є впровадження комбінованої схеми фіторемедіації:

– Для основного блоку очищення (біоплато інфільтраційного типу) рекомендується використання полікультури очерету звичайного (*Phragmites australis*) та рогозу (*Typha*). Очерет забезпечить стабільну гідравлічну провідність субстрату та базове видалення органіки і азоту, тоді як рогіз посилить акумуляцію супутніх важких металів та стабілізацію мулу.

– Для блоку доочищення (ставки з вільною водною поверхнею) обґрунтованим є вибір ряски малої (*Lemna minor*). Вибір зумовлений її високою швидкістю росту та специфічною здатністю до швидкого поглинання нітратів та фосфатів безпосередньо з водної товщі, що дозволяє знизити концентрацію загального азоту до 40 мг/л і нижче, а фосфору – до 1 мг/л, забезпечуючи високу якість води перед скидом у річку Південний Буг.

Враховуючи гідрохімічний стан басейну р. Південний Буг, що характеризується високим вмістом біогенних елементів, застосування монокомпонентних систем є недостатнім для досягнення нормативів скиду. Традиційні системи з горизонтальним потоком працюють переважно в анаеробних умовах

і ефективно видаляють органіку, але мають обмежену здатність до нітрифікації. Системи з вертикальним потоком, завдяки пульсуючому режиму подачі води, забезпечують належну аерацію та нітрифікацію, але слабку денітрифікацію.

Для забезпечення повного циклу видалення азоту пропонується впровадження гібридної системи штучних водно-болотних угідь (ШВБУ), що поєднує переваги обох типів потоків. Така схема дозволяє реалізувати процеси одночасної нітрифікації та денітрифікації, значно підвищуючи ефективність очищення навіть при низьких температурах [7].

Технологічна схема гібридного комплексу включає два послідовні ступені очищення із системою рециркуляції:

– перший ступінь – модуль вертикального підповерхневого потоку, коли стічні води подаються на поверхню модуля в пульсуючому режимі. Проходячи крізь ненасичений шар завантаження, вода збагачується киснем, що створює умови для життєдіяльності аеробних нітрифікуючих бактерій (*Nitrosomonas*, *Nitrobacter*). Основна функція першого ступеня – це окислення амонійного азоту до нітратів та розкладання органічних речовин.

– другий ступінь – модуль горизонтального підповерхневого потоку. При цьому вода з першого модуля надходить у зону з постійним рівнем насичення, де створюються аноксичні або анаеробні умови. Основна функція другого ступеня – це денітрифікація або відновлення нітратів до газоподібного азоту за участі гетеротрофних бактерій.

Стандартні субстрати (гравій, пісок, щебінь) виконують здебільшого функцію механічної фільтрації та носія для біоплівки, проте їхня сорбційна ємність щодо фосфору та амонію швидко вичерпується. Для умов басейну Південного Бугу пропонується використання спеціалізованих реактивних матеріалів. Рекомендується додавання шару природного цеоліту у завантаження першого модуля. Цеоліт володіє високою ємністю катіонного обміну, що дозволяє селективно адсорбувати іони амонію. Це особливо важливо в періоди пікових навантажень або зниження температури, коли біологічна нітрифікація сповільнюється. Адсорбований амоній згодом поступово окислюється біоплівкою (біорегенерація цеоліту). Оскільки видалення фосфору є лімітуючим фактором для площі споруди, доцільно облаштувати окрему фільтраційну касету або вихідну зону другого модуля, заповнену доменним шлаком, кальцитом або іншими матеріалами з високим вмістом кальцію, заліза чи алюмінію. Механізм видалення базується на хімічному осадженні фосфатів та їх адсорбції на поверхні матеріалу. Такий підхід дозволяє ефективно видаляти фосфор, запобігаючи евтрофікації річок. У зоні денітрифікації доцільно додавати органічні матеріали (тріска, солома) для забезпечення джерела вуглецю, необхідного для повного відновлення нітратів.

Модель складається з двох взаємопов'язаних блоків: блоку розрахунку кінетики видалення забруднювачів (для визначення площі споруди) та гідрологічного блоку (для оцінки водного балансу та впливу на відновлення водності річки) [8].

Необхідна площа дзеркала води ( $A_{req}$ ) для зниження концентрації конкретного забруднювача визначається за формулою:

$$A_{req} = -\frac{Q_{ww}}{k_A} \cdot \ln\left(\frac{C_e - C^*}{C_i - C^*}\right), \quad (1)$$

де  $Q_{ww}$  – середньодобова витрата стічних вод, що надходять до системи ( $m^3/добу$ );

$C_i$  – концентрація забруднювача на вході (мг/л);

$C_e$  – цільова концентрація забруднювача на виході (відповідно до нормативів ГДК для басейну Південного Бугу) (мг/л);

$C^*$  – фонові концентрації забруднювача, яка залишається у воді через внутрішні біологічні процеси розкладання біомаси (мг/л);

$k_A$  – площинний коефіцієнт швидкості реакції першого порядку (м/добу), який характеризує інтенсивність розкладання конкретної речовини.

Оскільки кліматичні умови Вінниччини характеризуються сезонними змінами, коефіцієнт швидкості реакції  $k_A$  коригується залежно від температури води (Т):

$$k_T = k_{20} \cdot \theta^{(T-20)}, \quad (2)$$

де  $k_{20}$  – константа швидкості при 20°C;

$\theta$  – температурний коефіцієнт (зазвичай 1,03–1,06 для біологічних процесів).

Це дозволяє прогнозувати зниження ефективності очищення в зимовий період та передбачати необхідний запас площі.

Проектна площа всього комплексу ( $A_{total}$ ) визначається за забруднювачем, що вимагає найбільшої площі для очищення [9]:

$$A_{total} = \max(A_{req,BCK}, A_{req,TN}, A_{req,TP}). \quad (3)$$

Для блоків доочищення з використанням плаваючих рослин, які плануються як частина комплексу, модель враховує асиміляційний потенціал рослин. Баланс видалення азоту ( $m_N$ ) розраховується як:

$$m_N = A_R \cdot S_{plant} \cdot t, \quad (4)$$

де  $A_R$  – асиміляційний потенціал ряски (для умов регіону приймається 2,4 гN/(кг·добу));

$S_{plant}$  – площа покриття рослинами.

Для оцінки впливу очисних споруд на відновлення гідрологічного режиму малих річок використовується рівняння водного балансу:

$$Q_{ww} = Q_{effluent} + Q_{ET} + Q_{recharge}, \quad (5)$$

де  $Q_{effluent}$  – об'єм очищеної води, що скидається безпосередньо в русло річки;

$Q_{ET}$  – втрати на випаровування та транспірацію рослинами (залежить від площі  $A_{total}$  та клімату);

$Q_{recharge}$  – об'єм води, що інфільтрується через ложе біоплато (при використанні систем без повної гідроізоляції або через спеціальні фільтраційні поля), поповнюючи ґрунтові води.

Підсумкова аугментація (збільшення) базового стоку річки ( $Q_{River\_new}$ ) визначається сумою прямого скиду та відкладеного живлення через ґрунтові води:

$$Q_{River\_new} = Q_{River\_natural} + Q_{effluent} + Q_{recharge} \quad (6)$$

Запропонована модель дозволяє не лише розрахувати геометричні параметри споруди для досягнення нормативів ГДК, але й кількісно оцінити внесок очисних споруд у підтримку водності річок басейну Південного Бугу в межений період. Параметри та вихідні дані математичної моделі роботи очисного

комплексу на основі штучних водно-болотних угідь для визначення необхідної площі та прогнозування динаміки зниження концентрацій забруднюючих речовин наведено у табл. 1. На основі наведеної математичної моделі авторами складено програмне забезпечення на Python адаптоване для використання на Google Colab, що впроваджено для використання у навчальному процесі студентів Вінницького національного технічного університету за спеціальностями E2 – Екологія та G2 – Технології захисту навколишнього середовища. Результати моделювання очисного комплексу на основі ШВБУ, вибору необхідної площі ШВБУ та прогнозування динаміки зниження концентрацій забруднюючих речовин наведено у табл. 2. та на рис. 1.

Таблиця 1

## Параметри та вихідні дані моделі

Основні параметри забруднювачів			
БСК			
$k_{20}$	константа швидкості при 20°C	0,15	
$\theta$	температурний коефіцієнт	1,04	
$C_i$	концентрація забруднювача на вході	50,0	мг/л
$C_e$	цільова концентрація забруднювача на виході (відповідно до нормативів ГДК)	6,0	мг/л
$C^*$	фонова концентрація	2,0	мг/л
Зальний азот			
$k_{20}$	константа швидкості при 20°C	0,05	
$\theta$	температурний коефіцієнт	1,05	
$C_i$	концентрація забруднювача на вході	45,0	мг/л
$C_e$	ГДК	2,0	мг/л
$C^*$	фонова концентрація	1,0	мг/л
Загальний фосфор			
$k_{20}$	константа швидкості при 20°C	0,03	
	температурний коефіцієнт	1,03	
$C_i$	концентрація забруднювача на вході	8,0	мг/л
$C_e$	ГДК	3,5	мг/л
$C^*$	фонова концентрація	0,05	мг/л
Параметри моделі річки			
$Q_{ww}$	витрата стічних вод	500	м <sup>3</sup> /добу
$T_{water}$	середня температура води	18	°C
$Q_{river\ nat}$	природний стік річки	1200	м <sup>3</sup> /добу
Параметри фітореMediaції (Lemna minor)			
$A_R$	асиміляційний потенціал	2,4	г N/(кг·добу)
Biomass density	густина біомаси ряски на поверхні	0,6	кг/м <sup>2</sup>
$t_{period}$	період розрахунку	30	дів
Гідрологічні коефіцієнти			
ET coeff	Коефіцієнт евапотранспірації	0.006	м/добу
recharge coeff	Коефіцієнт інфільтрації	0.002	м/добу

Результати моделювання очисного комплексу на основі ШВБУ

Показник	Значення	Одиниці
Необхідна площа	41720,7	м <sup>2</sup>
Лімітуючий фактор	загальний азот	
Видалено азоту рослинами за міс.	1802,33	кг N
Скид очищеної води	166,2	м <sup>3</sup> /добу
Інфільтрація	83,4	м <sup>3</sup> /добу
Втрати на випаровування	250,3	м <sup>3</sup> /добу

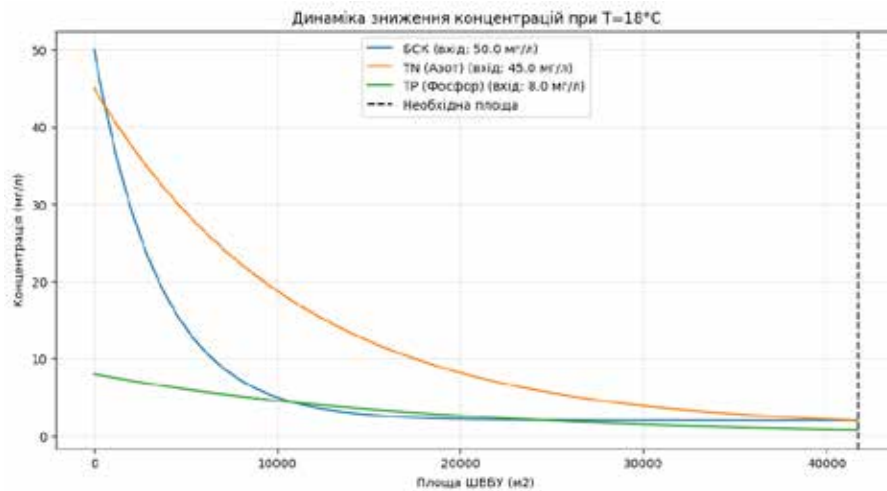


Рис. 1. Визначення необхідної площі ШВБУ та прогнозування динаміки зниження концентрацій забруднюючих речовин

Вплив на водність річок реалізується через два взаємопов'язані механізми:

– пряма аугментація стоку ( $Q_{effluent}$ ). Скид високоякісних очищених стічних вод, що відповідають екологічним нормативам, безпосередньо у русло, що є критично важливим джерелом живлення річки в посушливі періоди.

– поповнення ґрунтових вод ( $Q_{recharge}$ ). Інфільтрація частини очищеної води через проникні шари фільтруючого завантаження біоплато або через спеціально облаштовані зони поглинання (інфільтраційні басейни). Це сприяє підживленню водоносних горизонтів, які, у свою чергу, забезпечують стабільний підземний стік у річку (базовий стік) [2].

Для кількісної оцінки впливу впровадження системи ШВБУ на водний режим малої річки використано модель водного балансу. Загальний об'єм стічних вод ( $Q_{ww}$ ), що надходить на очищення, розподіляється на очищений стік, втрати на випаровування ( $Q_{ET}$ ) та поповнення ґрунтових вод ( $Q_{recharge.net}$ ):

$$= Q_{effluent} + Q_{ET} + Q_{recharge.net} \quad (7)$$

Втрати на евапотранспірацію ( $Q_{ET}$ ) залежать від площі дзеркала води, виду вищих водних рослин та кліматичних умов регіону. Результуюча вод-

ність річки ( $Q_{River\_new}$ ) після впровадження технології визначається як сума природного стоку ( $Q_{River\_natural}$ ) та компонентів аугментації:

$$Q_{River\_new} = Q_{River, natural} + Q_{effluent} + Q_{recharge.net} \quad (8)$$

Розрахунки, виконані на основі розробленої математичної моделі для типового об'єкта в басейні Південного Бугу (з добовим об'ємом стічних вод 1000 м<sup>3</sup>/добу та природним базовим стоком річки-приймача 5000 м<sup>3</sup>/добу в межений період), демонструють значний позитивний вплив технології. Встановлено, що при забезпеченні нормативного очищення від азоту та фосфору, система здатна забезпечити загальну аугментацію базового стоку ( $Q_{TotalBFA}$ ) на рівні 900 м<sup>3</sup>/добу. Це включає 700 м<sup>3</sup>/добу прямого очищеного стоку та 200 м<sup>3</sup>/добу, що надходять через механізм поповнення ґрунтових вод.

Такий обсяг додаткового живлення дозволяє збільшити водність малої річки в критичний мало-водний період на 18,0%. Це підтверджує, що впровадження ШВБУ є не лише заходом екологічної безпеки, але й ефективним інструментом управління кількісними показниками водних ресурсів, що підвищує стійкість річкових екосистем до кліматичних змін [2].

Важливою умовою застосування механізму інфільтрації є гарантована якість очищення води перед її потраплянням у водоносний горизонт. Запропонована гібридна схема очищення (поєднання вертикальних та горизонтальних потоків) забезпечує видалення нітрогенвмісних сполук та патогенних організмів, що мінімізує ризики забруднення підземних вод, які є стратегічним ресурсом питного водопостачання Вінницької області. Кероване поповнення водоносних горизонтів виступає як буфер, що згладжує пікові навантаження та забезпечує довготривалу гідрологічну стабільність басейну.

**Висновки.** У роботі обґрунтовано доцільність та ефективність впровадження природоорієнтованих технологій для вирішення комплексної проблеми забруднення водних ресурсів та дефіциту водності в басейні річки Південний Буг. Аналіз гідрохімічного стану річки Південний Буг виявив значне антропогенне навантаження, зумовлене переважно скидами комунальних підприємств та дифузним забрудненням від сільського господарства. Для умов регіону найбільш перспективною технологією є використання гібридних штучних водно-болотних угідь (ШВБУ), що поєднують модулі з вертикальним та горизонтальним підповерхневим потоком. Моделювання показує, що така система здатна забезпечити видалення загального азоту на рівні 90–97%. Вибір рослин-біоагентів є критичним для ефективності системи. *Phragmites australis* (очерет) та *Typha* (рогоз) забезпечують стабільну роботу фільтруючого шару

та видалення органіки, тоді як використання плаваючих рослин, зокрема *Lemna minor* (ряска мала), у ставках доочищення дозволяє ефективно вилучати нітрати та фосфати з ефективністю до 97,3% та 96,7% відповідно. Лімітуючим фактором для площі споруд є видалення сполук фосфору, що вимагає застосування спеціалізованих сорбційних матеріалів.

**Перспективи використання результатів дослідження.** Запропонована технологія вирішує не лише проблему якості води, але й сприяє відновленню гідрологічного режиму малих річок. Математичне моделювання підтвердило, що скид очищених стоків у поєднанні з керованою інфільтрацією (поповненням водоносних горизонтів) забезпечує суттєву аугментацію (підживлення) базового стоку річки в межений період. Це підвищує стійкість річкового басейну до кліматичних змін та посух. Впровадження ШВБУ є економічно вигідною альтернативою традиційним енергоємним очисним спорудам для малих громад та децентралізованих об'єктів, оскільки вимагає менших експлуатаційних витрат та не потребує висококваліфікованого персоналу. Крім того, створення водно-болотних угідь сприяє відновленню біорізноманіття та формуванню зеленої інфраструктури регіону. Таким чином, інтеграція гібридних біоплато в систему управління водними ресурсами басейну Південного Бугу є необхідним кроком для досягнення «доброго» екологічного стану вод відповідно до вимог Водної рамкової директиви ЄС та забезпечення сталого водокористування в регіоні.

### Література

1. Звіт про стратегічну екологічну оцінку Стратегії збалансованого регіонального розвитку Вінницької області на період до 2027 року / Вінниця : BOA. URL: [https://www.vin.gov.ua/images/doc/vin/ODA/ogoloshenia/Zvit\\_SEO.pdf](https://www.vin.gov.ua/images/doc/vin/ODA/ogoloshenia/Zvit_SEO.pdf) (дата звернення: 18.12.2025).
2. Каталог природоорієнтованих рішень в управлінні водними ресурсами в країнах Східного партнерства. Відень, Австрія : Консорціум «Європейський Союз для довкілля: управління водними ресурсами та екологічні дані», 2024. 107 с. URL: [https://eu4waterdata.eu/images/pdf/Translation/EU4ENVWaterData\\_NbSCatalogue-water-EaP\\_UKR\\_final.pdf](https://eu4waterdata.eu/images/pdf/Translation/EU4ENVWaterData_NbSCatalogue-water-EaP_UKR_final.pdf) (дата звернення: 18.12.2025).
3. Rybalova O., Bryhada O., Ilinskyi O., Bondarenko O., Zolotarova S. Phytoremediation methods for wastewater treatment. *Danish Scientific Journal*. 2020. № 41. P. 10-12.
4. Hu H., Li X., Wu S., Yang C. Sustainable livestock wastewater treatment via phytoremediation: Current status and future perspectives. *Bioresour Technol*, 2020. Vol. 315, 123809. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123809.
5. Du L., Chen Q., Liu P., Zhang X., Wang H., Zhou Q., Xu D., Wu Z. Phosphorus removal performance and biological dephosphorization process in treating reclaimed water by Integrated Vertical-flow Constructed Wetlands (IVCWs). *Bioresour Technol.*, 2017. Vol.243. P. 204-211. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.06.092.
6. Barco A., Borin M. Treatment performance and macrophytes growth in a restored hybrid constructed wetland for municipal wastewater treatment. *Ecological Engineering*, 2017. Vol. 107. P. 160-171. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2017.07.004.
7. Mena J., Rodriguez L., Nuñez J., Fernández F. J., Villaseñor J. Design Of Horizontal And Vertical Subsurface Flow Constructed Wetlands Treating Industrial Wastewater. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 2008. Vol. 111. P. 555-564. DOI: 10.2495/WP080551.
8. Subsurface Flow Constructed Wetlands For Wastewater Treatment: A Technology Assessment. Washington, D.C. : United States Environmental Protection Agency, Office of Water., 1993. 82 p. URL: <https://pages.mtu.edu/~nurban/classes/ce4505/fall11/Projects/EPAdocument.pdf> (дата звернення: 18.12.2025).
9. Wastewater Technology Fact Sheet: Wetlands: Subsurface Flow. Washington, D.C. : United States Environmental Protection Agency, Office of Water., 2000. 9 p. URL: [https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/wetlands-subsurface\\_flow.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/wetlands-subsurface_flow.pdf) (дата звернення: 18.12.2025).
10. Kvaterniuk S.M., Petruk V.G., Frolov V.F., Onyschuk V.E., Wojcik W., Pawlowski L., Smailova S., Kalizhanova A. Restoration Of The Southern Bug River Ecosystem By Removing The Biomass Of Higher Water Plants. *International Journal of Conservation Science*. 2021. Vol. 12. Special Issue 1. P. 755-764. [http://ijcs.ro/public/IJCS-21-56\\_Kvaterniuk.pdf](http://ijcs.ro/public/IJCS-21-56_Kvaterniuk.pdf).

Дата першого надходження статті до видання: 12.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026

## СУЧАСНИЙ ГІДРОЕКОЛОГІЧНИЙ СТАН СОФІЇВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА РІЧКИ ІНГУЛ

Наконечний І.В.<sup>1</sup>, Магась Н.І.<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова  
пр. Героїв України, 9, 54025, м. Миколаїв<sup>2</sup>Регіональний офіс водних ресурсів у Миколаївській області  
вул. Потьомкінська, 14, 54001, м. Миколаїв

nakonechniigor777@gmail.com, nataly.magas@gmail.com

У статті проаналізовано сучасний гідроекологічний стан Софіївського водосховища р. Інгул як важливого елемента водогосподарської системи посушливої степової зони та джерела питного водопостачання. Особливістю дослідження є інтеграція польових гідроморфологічних матеріалів і тривалого ряду лабораторних спостережень (2017–2025 рр.), що дало змогу виокремити сезонно-лімітуючі показники якості води та обґрунтувати їх пріоритетність у програмі спостережень. Метою роботи є оцінка екологічного стану водойми за чинними національними нормативно-методичними підходами. Інформаційну основу становили проектні морфометричні характеристики, результати лабораторного контролю гідрохімічних показників якості води за 2017–2025 рр., а також матеріали власних польових обстежень у межах водосховища та на р. Інгул вище за течією (візуальні спостереження, гідрометрія, ехолотування).

Показано, що водосховище має проточні риси каньйонного типу та суттєво впливає на локальний водний баланс. За переважанням головних іонів вода належить до сульфатно-хлоридно-натрієвого типу з підвищеною мінералізацією та жорсткістю; реакція середовища переважно слабколужна (рН  $\approx$  8,4), характерні підвищені значення електропровідності та карбонатна буферність. Встановлено сезонну трансформацію гідрохімічного режиму: у період весняної повені проявляється ефект розбавлення й оновлення водних мас, натомість у межень за високих температур і уповільненого водообміну посилюється роль внутрішньоводоймних процесів, зростає вплив біогенного й органічного навантаження та підвищуються ризики погіршення кисневого режиму.

Оцінку екологічного стану виконано за гідроморфологічними, фізико-хімічними та хімічними показниками. Інтегрально за сукупністю контрольованих параметрів вода Софіївського водосховища у 2025 році відповідає III класу (задовільний стан). Визначено сезонно-лімітуючі показники (зокрема електропровідність, сполуки фосфору та азоту, показники органічного забруднення), які доцільно розглядати як пріоритетні у програмах моніторингу та при плануванні водоохоронних заходів. *Ключові слова:* Софіївське водосховище, гідрохімічний режим, екологічний стан, евтрофікаційний потенціал, моніторинг питного водопостачання.

### Current hydroecological status of the Sofiivske Reservoir on the Inhul River. Nakonechniy I., Magas N.

The article analyzes the current hydroecological status of the Sofiivske Reservoir on the Inhul River as an important component of the water-management system of the arid steppe zone and a source of drinking-water supply. A distinctive feature of the study is the integration of field hydromorphological evidence with a long-term series of laboratory observations (2017–2025), which made it possible to identify seasonally limiting water-quality parameters and to substantiate their priority in the monitoring program. The aim of the work is to assess the ecological status of the water body using the applicable national regulatory and methodological approaches. The information base included design morphometric characteristics, results of laboratory control of hydrochemical water-quality indicators for 2017–2025, as well as data from the authors' field surveys within the reservoir and on the Inhul River upstream (visual observations, hydrometry, and echo sounding).

It is shown that the reservoir has through-flow features of a canyon type and significantly affects the local water balance. Based on the predominance of major ions, the water belongs to the sulfate–chloride–sodium type with elevated mineralization and hardness; the reaction is predominantly slightly alkaline (pH  $\approx$  8.4), and increased electrical conductivity and carbonate buffering are characteristic. A seasonal transformation of the hydrochemical regime was established: during the spring flood, dilution and renewal of water masses are observed, whereas during low-flow periods, under high temperatures and slowed water exchange, the role of internal reservoir processes increases, the influence of nutrient and organic loading intensifies, and the risk of deterioration of the oxygen regime rises.

The ecological status was assessed using hydromorphological, physicochemical, and chemical indicators. In an integrated assessment based on the set of controlled parameters, the water of the Sofiivske Reservoir in 2025 corresponds to Class III (satisfactory status). Seasonally limiting indicators were identified (in particular, electrical conductivity, phosphorus and nitrogen compounds, and indicators of organic pollution), which should be considered priorities in monitoring programs and in planning water-protection measures. *Key words:* Sofiivske Reservoir; hydrochemical regime; ecological status; eutrophication potential; drinking-water supply monitoring.



**Постановка проблеми.** Північно-Західне Причорномор'я, володіючи досить розвинутою гідрографічною мережею, загалом є вододефіцитним регіоном, що зумовлено кліматичними і гідрогеологічними умовами та специфікою водного балансу місцевих водойм, комплекс яких суттєво обмежує водогосподарчий потенціал регіону [1]. Особливо актуальними є проблеми питного і поливного водозабезпечення для суто степової території Миколаївської області [2], концентрація населених пунктів якої традиційно тяжіє до гідромережі Південного Бугу [3, 4]. Проте, його відносно невелика водність (норма стоку  $2,8 \text{ км}^3$ , середньорічні витрати в межах  $108 \text{ м}^3/\text{с}$ ) при значних обсягах водозбору ( $600\text{-}900 \text{ млн. м}^3/\text{рік}$ ) вже зумовлює досягнення критичних рівнів експлуатації річки, основні водні запаси якої мають приточний характер [4, 5].

Ключова причина вододефіциту в Нижньому Побужжі – нестача природної вологи. Так, місцевий річковий стік, який формується в межах Миколаївської області, у середній за водністю рік становить лише  $0,57 \text{ км}^3$ . Сумарний середньо-багаторічний річковий стік, із урахуванням стоку із суміжних областей, сягає  $3,4 \text{ км}^3$  [2]. За цих умов більша частина сільських населених пунктів Миколаївщини через нестачу підземних родовищ якісної води (експлуатаційні запаси води на одного мешканця становлять  $0,09 \text{ м}^3/\text{добу}$ ) проявляє підвищену залежність від поверхневих джерел водопостачання [6, 7]. Останніми, окрім Південного Бугу, слугують декілька середніх за розмірами річок, у т.ч. його права притока – річка Інгул.

Даний водотік довжиною  $354 \text{ км}$  започаткований на Південно-Придніпровській Височині (адміністративно – в північній частині Кіровоградської області) і від витоків до свого впадіння в Південний Буг цілком розташований у степовій місцевості. Згідно діючої класифікації [8] це середня за розмірами річка, але саме вона забезпечує безальтернативне водопостачання чисельної низки населених пунктів уздовж своєї течії. Руслові водосховища, розташовані в долині Інгулу, започатковують декілька магістральних водоводів для питного водопостачання віддалених населених пунктів Кіровоградської та Миколаївської областей [9, 5]. Одним із найпотужніших є магістральний водогін «Софіївка-Новий Буг-Казанка-Кривий Ріг», завдяки якому забезпечується водопостачання  $109 \text{ сіл}$  і містечок степових місцевостей Інгуло-Інгулецького межиріччя [10, 11].

Критична нестача водних ресурсів Кіровоградської та Миколаївської областей вже в середині минулого сторіччя ініціювали необхідність більш розширеного використання водного потенціалу річки Інгул. Для накопичення річкового стоку в 1962-1969 роках були створені Кіровоградське, Докучаєвське, Інгульське та Софіївське руслові водосховища. Загальний об'єм накопиченої у цих водосховищах води складає

$65 \text{ млн. м}^3$ , що в півтора рази перевищує сумарний стік річки (середня багаторічна норма стоку  $0,39 \text{ км}^3$ ). Окрім водосховищ, у межах верхньої частини водозбору Інгулу та на його верхніх притоках нині функціонує більше 500 ставків, сумарним об'ємом до  $11 \text{ млн. м}^3$  при  $1309 \text{ га}$  площі водного дзеркала [12]. Таким чином, у наявний час зарегульованість стоку верхньої частини річки Інгул навіть у багатоводні роки сягає  $96\text{-}100\%$ .

Наявність декількох водосховищ, які забезпечують питний і частково поливний водовідбір, суттєво впливає на гідроекологічний стан річки Інгул, порушуючи його логічний режим саме у верхніх, відносно швидкотечійних ділянках. Греблі спричиняють їй перешкоди для винесення у вигляді твердого і колоїдного стоку геохімічних компонентів із ґрунтового покриву і скельної основи Українського кристалічного щита. Через значну ( $67\text{-}72\%$ ) розораність водозбору набула розвитку інтенсивна міграція змитих польових ґрунтів, які піддаються накопиченню в ставках і водосховищах [13]. Раніше, за відсутності гребель, всі міграційні сполуки разом із рухливими формами геохімічних сполук виносились у пониззя річки та в Дніпро-Бузький лиман і далі в море [14]. Не меншу проблему в плані деструкційного впливу складають і значні обсяги водовідбору та відповідного скиду зворотних вод, що глибоко порушує стабільність наявних гідроеко-систем річкового каскаду водосховищ і вичерпує потенціал їх самоочищення [15, 16].

Таким чином, сучасний гідроекологічний стан річки Інгул, що є важливим джерелом водопостачання для посушливих територій Кіровоградської та Миколаївської областей, а також для окремих населених пунктів суміжних регіонів, є актуальним об'єктом дослідження. Софіївське водосховище як ключова ланка гідросистеми р. Інгул і вододжерело субрегіональної системи питного водопостачання потребує всебічного вивчення, що й визначило вибір теми та предмета статті.

Метою роботи є аналіз поточного гідроекологічного стану Софіївського водосховища та оцінка екологічного стану цієї водойми.

**Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.** Робота тісно пов'язана з вирішенням завдань, що наведені у Водній стратегії України на період до 2050 року [17], Обласній програмі «Питна вода Миколаївщини» на 2021-2025 роки [18], Комплексної програми охорони довкілля Миколаївської області на 2021-2027 роки, науково-дослідній роботі «Розробка заходів та засобів раціонального водокористування, зниження антропогенного навантаження на водні екосистеми півдня України» (державний реєстраційний № 0124U001593).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Річка Інгул, завдяки своїй повноводності та розта-

шуванню в маловодному степовому регіоні здавна слугувала місцем існування людських поселень, прикладом яких є стоянки і селища палеоліту – Розанівка, Софіївка, Ганнівка, Новопетрівка, Червона Поляна тощо [19]. Важко нині оцінити рівень давніших знань щодо географії та гідрографії цієї річки, яка поряд з Південним Бугом (Гіппанісом) була відома в загальних рисах ще в античні часи [20]. Гідрографія Інгулу та його гирла в районі сьогодишнього міста Миколаєва картографічно вірно відображені вже з середини XVII сторіччя на картах Боплана, П. Дювала «Королівство Польське», Річчі-Занноні [21]. Проте, перші системні дослідження річки розпочаті лише в 20-ті роки минулого сторіччя і належать фахівцям новостворених (2019) Державного Гідрологічного інституту та Української гідрометеослужби (1929). Більш детальні дослідження басейну Інгулу продовжені в 50-60-ті роки експедиціями УкрНДГМІ, Інститутом гідротехніки і меліорації, Інститутом водогосподарсько-екологічних проблем та інших установ [22], результати роботи яких відображені в довідниках і монографіях.

Із числа більш новітніх матеріалів щодо гідрології та гідроекології річки Інгул та його водосховищ основні публікації мають характер оглядових і належать В.В. Гребіню (2011, 2013, 2017) і В.М. Тимченко (2006, 2008, 2009). Геоморфологічні та геологічні аспекти водозбору і долини річки вивчала Н.М. Барщевська (2004, 2008, 2014). Гідрохімічні та екологічні оцінки води і стану річки Інгул наведені в публікаціях А.В. Татарова і О.В. Стрільця (2014), Н.С. Лободи з співавторами (2010), Т.М. Альохіної (2013), Є.М. Безсонова (2020).

При цьому, слід відзначити обмаль публікацій саме по гідроекології Софіївського водосховища, основні матеріали щодо якого були представлені в довідниках 90-х років, а нині епізодично зустрічаються лише в щорічних звітах Кіровоградського та Миколаївського обласних управлінь екології. Осадонакопиченню та його характеристикам присвячена лише стаття Т.М. Альохіної (2016), яка вивчала стан Софіївського і Карачунівського водосховищ у 2012-2016 рр. Окремі матеріали щодо видової структури іхтіофауни водосховища [23] та стану його вищої водної рослинності [24, 25] опубліковані майже 10 років тому і до наявного часу більш новітніх даних немає. Відповідно, сучасні (2021-2024) дослідження стану і оцінки води Софіївського водосховища є важливими в інформаційному плані та розкривають основні проблеми водойми, яка піддається потужному впливу природних і антропогенних чинників.

**Матеріали та методи.** Матеріалом для даної статті послуговували результати досліджень Софіївського водосховища у 2021-2025 рр., спрямовані на вивчення гідрологічного, гідрохімічного та іхтіологічного стану водойми і її гідроекологічної

оцінки. Важливими вихідними даними слугували значні обсяги літературних, картографічних та фото матеріалів, відкритих звітних і проектних даних, ретроспективних і новітніх.

Основою для виконання гідроекологічної оцінки слугували фактичні дані, отримані в результаті проведення польових і окремих лабораторних досліджень водойми. Перші поєднували результати візуальних, гідрометричних і гідроморфологічних обстежень водосховища (в т.ч. за допомогою ехолоту) та звітні облікові дані гідропосту зі створу перед греблею траншейного водоскиду. Для комплексної оцінки екологічного стану водойми було використано офіційні результати моніторингу за гідрохімічними показниками якості води Лабораторії моніторингу якості вод Регіонального офісу водних ресурсів у Миколаївській області, за період з 2017 по 2025 роки.

Оцінювання відповідності встановлених характеристик води Софіївського водосховища екологічним нормативам здійснювали відповідно до Методики визначення масивів поверхневих та підземних вод [26], Методики віднесення масиву поверхневих вод до одного з класів екологічного та хімічного станів масиву поверхневих вод [27] та Екологічних нормативів якості води для визначення екологічного стану масиву поверхневих вод [28]. Використання вибраних підходів, що ґрунтуються на порівнянні фактичних значень показників із граничними значеннями типоспецифічних класифікацій за принципом «найгірший показник/елемент визначає підсумкову оцінку» (one-out, all-out), дає змогу визначити клас екологічного та хімічного стану масиву поверхневих вод. У зв'язку з відсутністю даних за біологічними показниками оцінку стану водосховища виконано за гідроморфологічними, хімічними та фізико-хімічними показниками.

Для проведення аналітично-моніторингових оцінок стану іхтіофауни використано ретроспективні літературні та авторські результати обліку видового складу риб, досліджуваних у 2013-2014 рр. [23] і в сучасний період.

**Коротка характеристика території та об'єкту досліджень.** Софіївське водосховище розташоване в долині річки Інгул на північ від села Софіївка (рис. 1–2) і знаходиться цілком у межах адміністративної території Миколаївської області. Це типове руслове водосховище, що сформоване в каньйонній ділянці річки, яка долає кінцеві прориви скельного фундаменту Українського кристалічного щита і виходить на рівнинний простір Причорноморської Низовини [29].

Споруджено водосховище у 1968 році. Утворене воно 300-метровою земляною дамбою з шириною у підосві 140 метрів та 245-метровою бетонною греблею траншейного типу. Остання перекидає не природний створ русла, а спрямовується правобережним насипним берегом у штучний каньйон

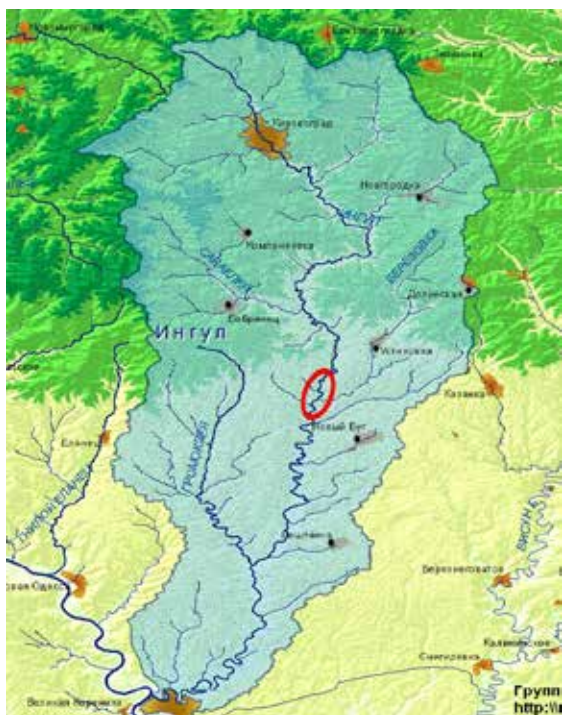


Рис. 1. Басейн річки Інгул та ділянка розміщення Софіївського водосховища (виділена червоним) [30]



Рис. 2. Софіївське водосховище на карті Генштабу РА, фрагмент листа L-36-5, зйомки 1983-1985 рр., масштаб 1:100 000 [31]

в місці давнього видобутку граніту. Завдання на проектування Софіївського водосховища було надано Миколаївським обласним управлінням водного господарства і узгоджено з Миколаївським облвиконкомом 2 червня 1960 року. Проектне завдання на будівництво Софіївського водосховища розроблено Одеським філіалом інституту «Укрдіпроводгосп» і затверджено Держводгоспом УРСР у грудні 1962 року (перезатверджено в 1966 р. Міністерством меліорації і водного господарства).

Будівництво комплексу гідротехнічних споруд водосховища було розпочато в квітні 1964 року

і закінчене в лютому 1969 року. З 29 лютого по 3 березня 1969 року були закінчені заключні роботи по перекриттю річки Інгул і новозбудовані гідроспоруди поставлені під навантаження. Вже 20 березня 1969 року Софіївське водосховище було заповнено до відмітки нормального підпірного рівня і вода весняної повені почала скидатись через траншейний водоскид. Упродовж експлуатації верхні ділянки греблі періодично ремонтували (рис. 3а), а в 2019-2021 рр. здійснена часткова реконструкція греблі з одночасним закриттям донного стоку (рис. 3б)



а)



б)

Рис. 3. Стан траншейного водоскиду Софіївського водосховища: а – навесні 2019 року; б – після ремонту навесні 2021 року

Таблиця 1

## Основні проектні морфологічні характеристики Софіївського водосховища

Рівні води	Довжина, км	Ширина макс / сер, м	Глибина макс / сер, м	Площа дзеркала, га	Об'єм, млн.м <sup>3</sup>		Протяжність берего-вої лінії, км	Площа мілководдя (до 2 м), га
					повний	корисний		
НПР	18,0	700/260	19,50/7,65	470,0	36,0	31,0	43,20	70
ФПР	18,2	800/265	21,5/7,65	560,0	48,0	-	45,00	100
РМО	9,6	400/140	9,0/3,6	136,0	5,0	-	23,1	50

Джерело: [32]

У кінці 2002 року Софіївське водосховище цілком, разом із прибережною водоохоронною зоною, передано новоствореному Регіональному природному парку «Приінгульський» (РПП), сучасна площа якого 3152,7 га [34, 35]. Саме водосховище в складі РПП набуло статусу окремого гідрологічний заказнику «Софіївське водосховище», проте як водойма, підпорядковується Регіональному офісу водних ресурсів у Миколаївській області.

**Гідроморфологічні умови водойми.** Софіївське водосховище досить велике і глибоке (7,0-19,5 м), друге за розмірами в Миколаївській області (після Олександрівського), його площа 473 га, повний об'єм 36 млн м<sup>3</sup>, корисний об'єм – 31,0 млн. м<sup>3</sup>. Ложе водойми субмеридіонально простягається на 18 км від греблі вгору по річці, практично до межі Кіровоградської області. Пересічна ширина водосховища – 0,26 км, максимальна- 0,7 км, є декілька заток, розташованих у нині затоплених гирлових ділянках притокових річок (Березівка, Сагайдак тощо). Сучасні береги мають досить стрімкий похил, переважно заліснені (переважають широколисті лісонасадження віком 50-60 років), з лівого берега присутні також урвисті ділянки берега в місцях виходу гранітів. Середня глибина водосховища 7,65 м, максимальна 19,5 м, коливання рівня води утримуються в межах ±0,5 м.

Згідно наведеним даним (табл. 1), водосховище можливо визначити в якості проточної водойми каньйонного типу, для якої загалом не характерні значні (більше 1 м) перепади рівня води, а відповідно і різкі зміни об'єму водосховища. Максимальна розрахункова висота хвилі – 0,75 м. Термін замулення водосховища, за проектом – 39 років. Останні параметри є прямо взаємозалежними, що передбачено проектними змінами, показники яких відображені в таблиці 2.

Таблиця 2

## Координати кривих залежності площ водного дзеркала та об'єму від характерних рівнів водосховища

Рівень води, м	Об'єм млн.м <sup>3</sup>	Площа, га
ФПР = 41,50	48,0	560,0
НПР = 39,50	36,0	470,0
РМО = 29,0	5,0	136,0

За період існування водосховища коливання рівня та об'єму водосховища жодного разу не перевищували проектні і навіть не сягали максимально (так і мінімальних) розрахункових рівнів. У той же час, щороку сезоні коливання площі та об'єму відбувались за довгорічними закономірностями, пов'язаними з гідрокліматичними умовами басейну і притокними обсягами води (табл. 3).

Таблиця 3

## Середні багаторічні коливання рівня Софіївського водосховища впродовж 2021-2025 рр.

Показники	Рівень води (від нуля гідропосту в створі греблі водосховища), м
<b>Весняно-паводкові</b>	
Максимальні	39,55
Мінімальні	39,20
Середні	39,52
<b>Літньо-паводкові</b>	
Максимальні	39,65
Мінімальні	38,72
Середні	39,38
<b>Межenni (серпень-вересень)</b>	
Максимальні	39,53
Мінімальні	37,84
Середні	38,62
<b>Зимові</b>	
Максимальні	39,55
Мінімальні	38,90
Середні	39,48

Так, найбільші паводкові рівні води звичайно виникали в кінці лютого – березні, мали місце і окремі паводкові сплески у липні-серпні. Восени практично відсутні значні коливання рівня, а по мірі становлення льодоставу останні набувають нівелювання.

**Гідрологічні характеристики.** Детальні гідрологічні характеристики водотоку в сучасний період відображені даними таблиці 4.

Таблиця 4  
Гідрологічні характеристики  
Софіївського водосховища

Параметр контролю	Показник
Площа водозбору річки до створу греблі	6100 км <sup>2</sup>
Максимальна витрата: 1% забезпеченості 5% забезпеченості	1250,0 м <sup>3</sup> /с 775,0 м <sup>3</sup> /с
Максимальний обсяг стоку: 1% забезпеченості 0,5% забезпеченості	775,0 млн.м <sup>3</sup> 854,0 млн.м <sup>3</sup>
Середньо-багаторічний об'єм стоку: Річний За повінь	260 млн.м <sup>3</sup> 192,0 млн.м <sup>3</sup>
Обсяг стоку забезпеченістю (Р%) Р = 50% Р = 75% Р = 95%	233,4 млн.м <sup>3</sup> 137,2 млн.м <sup>3</sup> 53,6 млн.м <sup>3</sup>
Середньомісячні літні мінімальні витрати за багаторічний період	0,083 м <sup>3</sup> /с
Середньомісячні зимові мінімальні витрати за багаторічний період	0,25 м <sup>3</sup> /с
Абсолютні добові літні мінімальні витрати за багаторічний період	0,018 м <sup>3</sup> /с
Абсолютні добові зимові мінімальні витрати за багаторічний період	0,1 м <sup>3</sup> /с

Згідно наведених даних (табл. 4), сучасні гідрологічні параметри стоку Верхнього Інгулу, фіксовані в створі греблі Софіївського водосховища, є досить нестабільними, проявляючи пряму залежність від сезонних кліматичних коливань, а саме – від обсягу поверхневого стоку, температур і рівня випаровування. Розрахункові втрати водойми через випаровування складають 2,18 млн. м<sup>3</sup>/рік, хоча реальні витрати певно відчутно більші. При цьому на інтенсивність випаровування впливають тривалі періоди високих температур, а також біотичні чинники – рослинність і фауністичні угруповання мілководної зони.

**Твердий стік.** Середньорічний показник вмісту у воді мінерального осаду (1992-2010) складає 630 мг/л, максимальний досягав 2500 мг/л<sup>3</sup>, показник максимальної термінової мутності у вересні 1971 року сягнув 8900 мг/л<sup>3</sup>. У перерахунку на середній багаторічний стік води, сумарний стік твердих наносів до чаші водосховища [32] складає 200 тис. т/рік, середній річний модуль твердого стоку – 42 т/рік/км<sup>2</sup>. Загалом води верхньої частини річки Інгул значно насичені мінеральними сполуками, а під час паводків – органікою та детритом. Наявність мінеральних домішок зумовлена специфікою рельєфу донної поверхні та берегів річища Інгулу і його верхніх притоків, які впродовж майже 100 км проходять відрогами Південно-Придніпровської Височини. Остання,

геоструктурно являє собою південно-західний борт Українського кристалічного щита, сформованого потужними гранітними товщами, перекритих розвиненими відкладами осадових порід [33].

Флотаційна потужність Софіївського водосховища досить виражена і спричиняє осадження значної частки притокової маси твердого і колоїдного стоку, обсяг накопичення якого розрахунково складає в роки середньої водності 93 тис. т/рік. В чаші водосховища відбуваються і певні флотаційні зміни загальної мінералізації води (- 3-4%), зумовлені зв'язуванням частки іонного стоку колоїдно-мулістими донними відкладами та водною рослинністю. Найбільш помітні флотаційні різниці проб води (до і після водосховища) за вмістом кальцію, фосфору, амонійного азоту.

Осадове накопичення водосховища у наявний час набуло значних рівнів і помітно впливає на якість води та геоекологічний стан водойми. Намулові товщі місцями сягають до 1,8 м і акумулюють в собі великі обсяги детриту, органіки, ґрунту, піску та гравію. При цьому розподіл осадових товщ просторово украй нерівномірний і визначається первинною морфологією та рельєфом тальвегу, характером стокових явищ, локальними режимами течійного режиму та вітровим нагоном води.

Розташування мулістичних наносів і осаду різномірне і досить динамічне. Місця їх концентрації простежені за допомогою ехолоту і картографічно демонстровані за окремими ділянками водосховища (рис. 4-5)

У загальному плані глибини та характер накопичених донних відкладів закономірно повторюють первинний профіль ущелини, де було розташоване природне русло Інгулу. Прибережні ділянки, в залежності від профілю долини містять відклади, сформовані змитим із схилів ґрунтом, детритом, гравієм та гравітаційним осипом із берегів (по суті делювієм із елементами пролювію), демонструючи певну відсортованість накопичень за складом і розміром. Всі ці грубі осадонакопичення практично по всій донній площі вкриті шаром тонкого лесоподібного пилювато-сірого мулу, товщиною 3-11 см.

Окрім цього, дані промірів ехолотом показують просторово різний розподіл складу і товщини осадових товщ. Так, вершина водосховища, де приймається річковий стік Інгулу і на 300-400 м вниз містить переважно кам'янисті та крупнопіщані відклади з присутністю валунів, гравійних мас, окремих грубо-уламкових форм вапняку (жорства), вкритих тонким (3-5 см) шаром глинисто-лесового намулу. З цієї маси виділяються окремі цілісно-гранітні прориви висотою до 1,7 м, поверхня яких омиваючись течією майже вільна від осаду. Прибережні ділянки мілководдя вузькі (2-3 м), вкриті жорствою та піщаним намулом, зазвичай порослі водно болотяною рослинністю на основі очерету звичайного (*Phragmites australis*) і рогози (*Typha latifolia*).



Рис. 4. Загальна структура глибин водосховища

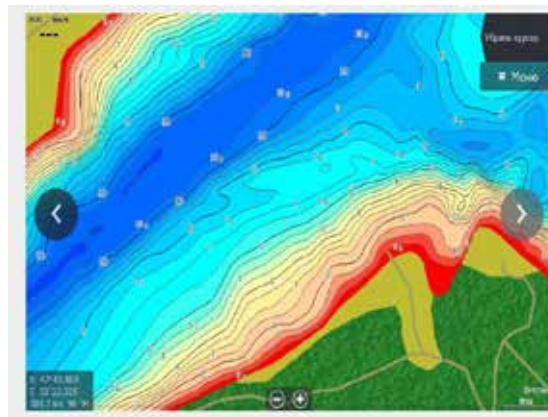


Рис. 5. Характер донних відкладів та відмітки глибин у верхній частині водосховища

Первинно-руслорова частина, поглиблюючись (до 10-12 м) у сторону греблі, вкрита гравієм під крупно-піщаними товщами, які в місцях вигинів руслу накопичуються до 2 м товщиною. Поверхня цих піщано-гравійних відкладів створена лесоподібним осадом, іноді товщиною 10-17 см. Цей осад легко взмучується і швидко осідає, зберігаючи тривалий час тонкі (3-5 см) канавки від проходження рибальських шнурів із грузиками. Помітні невеликі ділянки підводних зсувів мулистих накопичень, які періодично зміщуються з схилів боргів до руслової частини водойми. Добре виражена специфіка відкладів у конусах винесення, сформованих притоковими річками, особливо лівими притоками. Останні привносять суто піщані фракції, представлені жовтими дрібнозернистими, явно відсортованими пісками, які різко контрастують із чорними річковими крупнозернистими пісками. Товщі наносів у межах конусів винесення сягають 3 м і більше, зростаючи в сторону берегів.

Пригреблева ділянка глибока і значно замулена. Фоновими відкладами є дрібно-пилові, майже лесоподібні товщі, які цілком вкривають всю донну частину суцільним шаром товщиною до 0,5 м і більше. Уздовж берегів присутні ділянки мілководдя, які влітку слугують зоною інтенсивного розростання амфіфітів. Далі від берегів глибини стрімко зростають до первинного русла, при цьому схилів ділянки руслового каньйону майже не містять осадових накопичень, які концентруються в тальвегу. На дні зустрічаються крупні гранітні валуни вторинного походження, які потрапили з відбортовки правого берега пригреблевої частини водосховища. Ділянки мілководдя центральної і пригреблевої частини лівого схилу мають «смугасту» структуру відкладів, починаючись від берега з жорстви, яка переходить у піщані та надалі в глинисто-грунтові осади товщиною до 1,2 м.

Таким чином, розгляд результатів обстеження водосховища з метою оцінки донних відкладів свідчить про значний, місцями у край потужний рівень

їх накопичення. Структура осадових товщ проявляє певну стратиграфічну будову, залежну від обсягів притоку річкової води та сезонно-паводкових обсягів твердого і колоїдного стоку до водосховища. Місцевий стік з власного водозбору водосховища відносно невеликий і розрахунково не перевищує 7-10% від притокового привнесення з верхніх ділянок річки та її притоків. Головним джерелом осадових утворень у Софіївському водосховищі є водно-міграційні компоненти поверхневого стоку, привнесені річкою Інгул.

**Льодові явища.** Через постійну течію річка Інгул замерзає лише при великих морозах, звичайно кінці грудня і виходить із під льоду в кінці лютого. Водосховище децю відрізняється більш раннім замерзанням, проте і його режим льодоставу нестійкий. Зимовий льодостав настає звичайно з 15 грудня і триває до початку березня. Середня з найбільших товщина льоду – 31 см, максимальна – 76 см спостерігалася в березні 1964 р. Тривалість льодоставу складає від 50 до 150 діб (у середньому 105 діб). Середня дата початку льодоходу – 10 березня.

До 2013 року майже щорічно мав місце льодохід, завдяки якому від намулу і водної рослинності очищались прибережні мілководдя. Проте останні роки відрізняються відсутністю льодоходу і підвищеною інтенсивністю розростання водної рослинності. У 13-20 % зим льодостав не спостерігається. При цьому, фактор льодового покриву є одним із потенційно небезпечних первинних факторів, який у поєднанні із весняними водами на фоні мерзлого ґрунту може стати причиною льодових заторів. Також лід є фактором прямого впливу і лімітуючим чинником стану іхтіофауни та взагалі біоти водосховища. Льодовий режим водосховища відображений даними таблиці 5.

Загальна ситуація щодо льодового режиму Інгулу в цілому задовільна для умов існування риби, лише в окремі роки і лише на короткий час (2-10 діб) вся водна поверхня буває скута кригою. Швидка течія верхніх ділянок річки забезпечує існування промоїн

## Льодовий режим водосховища

Дата встановлення льодоставу			Товщина льоду, см		Висота снігу на льоду, см		Дата очищення від льоду			Період спостереження
рання	пізня	середня	максимальна	середня	максимальна	середня	рання	пізня	середня	
14.11	31.12	22.12	66	25	50	15	12.02	24.04	17.03	3 грудня 1967 р.

та довге утримання ділянок чистої води на перекачах, сприяючи достатньому насиченню води киснем. Для водосховища, яке отримує значні обсяги киснево-насичених притокових вод заморні явища практично невідомі.

**Іхтіофауна.** Річка Інгул до наявного часу зберігає статус важливої нерестової водойми, яка забезпечує відтворення та нагул прохідних і туводних риб, проте реальна значимість такого статусу зберігається виключно в пониззі. Саме в пониззі збережені логічно-русліві та плавнево-озерні ділянки, які й слугують основними місцями нересту і нагулу рибної молоді. Втрата суцільно-проточного режиму Інгулу внаслідок побудови гребель і водосховищ зумовила значну перебудову річкових іхтіокомплексів у верхніх ділянках річки, акваекосистеми яких у цілому зберігають порівняно задовільні умови.

Судячи за історичними даними, річка Інгул здавна слугувала важливим рибогосподарчим об'єктом, особливо в пониззі. Найбільш важливими промисловими видами слугували прохідні осетрові (переважно стерлядь *Acipenser ruthenus*), вирозуб *Rutilus frisii*, рибець *Vimba vimba*, чехонь *Pelecus cultratus* та напівпрохідний лящ *Abramis brama* лиманської популяції. Основний їх промисел був зосереджений у пониззі, тоді як у верхів'ях суттєвого промислового значення річка не мала. Проте у верхів'ях до кінця XIX сторіччя зустрічалась туводна форель струмкова *Salmo trutta* (пістрявка, струг) і за деякими, досить сумнівними даними можливо був харіус європейський *Thymallus thymallus*. Звичайними мешканцями річки були карась звичайний *Carassius carassius*, плітка (туводна та лиманська тараня) *Rutilus rutilus*, підуст звичайний *Chondrostoma nasus*, окунь *Perca fluviatilis*, шереспер *Aspius aspius*, чисельною була щука *Esox lucius*. Станом на середину XX сторіччя прохідні види риб в Інгулі ще зустрічались, та в період 70-х років вже стали рідкісними, хоча лящ лиманський і рибець були доволі чисельними.

Щодо іхтіофауни Софіївського водосховища наявні матеріали досить обмежені і мають загальний характер. Короткий аналіз видового складу риб до побудови і в період функціонування водосховища виконаний лише в 2011-2014 рр. [23] і свідчить про закономірне формування змішаної штучно-природної іхтіофауни на основі видів природно-річкового ядра та низки інтродуцентів і вселенців. Так, станом на 2011 рік у водосховищі були від-

сутні рибець, підуст, карась звичайний, а фоновими видами стали плітка, плоскирка *Blicca bjoerkna*, лящ, окунь, карась сріблястий *Carassius gibelio*, щука, судак *Sander lucioperca*. Досить звичайним став сом *Silurus glanis*, короп *Cyprinus carpio*, білий товстолоб *Hypophthalmichthys molitrix* і білий амур *Stenopharyngodon idella*. Проте останні в умовах водосховища ніколи не входили в число фонових видів навіть на фоні значних обсягів багаторічних випусків зарибку, що вірогідно зумовлено потужним пресом хижаків.

**Гідрохімічні умови.** У гідрохімічному відношенні вода Софіївського водосховища за переважанням головних іонів належить до сульфатно-хлоридно-натрієвого типу. За 2017–2025 рр. середні концентрації основних іонів становили:  $\text{SO}_4^{2-} \approx 553 \text{ мг/дм}^3$ ,  $\text{Cl}^- \approx 175 \text{ мг/дм}^3$ ,  $\text{Na}^+ \approx 246 \text{ мг/дм}^3$ ; реакція середовища – слабколужна ( $\text{pH} \approx 8,4$ ). Вміст розчинених речовин за сухим залишком є високим і сезонно змінним – 759–1700 мг/дм<sup>3</sup> (у середньому  $\approx 1525 \text{ мг/дм}^3$ ), що відображає стійко підвищену мінералізацію та засоленість. За показником «мінералізація» зафіксовано коливання 577–1666 мг/дм<sup>3</sup> із переважанням рівнів близько 1000–1110 мг/дм<sup>3</sup>; максимум припадає на осінь 2024 р., мінімум – на березень 2025 р., що може відповідати короткочасному епізоду розбавлення.

Іонно-сольовий фон поєднується з вираженою карбонатною буферністю: лужність переважно становить 5,7–6,5 мг-екв/дм<sup>3</sup> (3,1–7,7 мг-екв/дм<sup>3</sup>), гідрокарбонати – 348–389 мг/дм<sup>3</sup> (189–470 мг/дм<sup>3</sup>). Вода характеризується дуже високою жорсткістю (переважно 12–13 мг-екв/дм<sup>3</sup>); у поєднанні зі слабколужним рН це визначає умови міграції біогенних елементів і металів (сорбція, комплексоутворення) та може підвищувати чутливість екосистеми до зовнішнього навантаження.

Оскільки водосховище формується притоком р. Інгул, показники верхньої ділянки річки відображають роль твердого стоку та контрастність гідрохімічного режиму у маловодні періоди. Концентрація завислих речовин змінюється від 0,4 до 71,2 мг/дм<sup>3</sup>, каламутність – від 0,32 до 5,70 NTU. Найвиразніший контраст зафіксовано у верхньому створі у період межени маловодного 2017 року, коли поряд зі зростанням зважених речовин спостерігалось різке підвищення іонного навантаження (мінералізація до 6306 мг/дм<sup>3</sup>,  $\text{Cl}^-$  до 2765 мг/дм<sup>3</sup>,  $\text{Na}^+$  до 1865 мг/дм<sup>3</sup>). У межах водосховища уповільнення течії та осад-

ження частинок (седиментація, флокуляція) сприяють частковому самоосвітленню води.

Високий сольовий фон поєднується з біогенним та органічним навантаженням і в теплий період супроводжується евтрофікаційними проявами. Показовим є епізод наднасичення води киснем до 243% у травні 2023 р. за концентрації розчиненого кисню 21,93 мг/дм<sup>3</sup> при температурі 20°C, що відповідає інтенсивній фотосинтетичній продукції у добре прогрітих мілководних водоймах. Водночас у межень фіксуються потенційно несприятливі стани кисневого режиму: мінімальні концентрації розчиненого кисню знижувалися до 2,8 мг/дм<sup>3</sup> (2020 р.) та 4,01–4,9 мг/дм<sup>3</sup> (2024–2025 рр.), тобто до рівнів, асоційованих із ризиком гіпоксії для гідробіонтів.

Органічне навантаження відображається в показниках БСК<sub>5</sub> та окиснюваності. У 2017–2025 рр. БСК<sub>5</sub> переважно становить  $\approx 2,0$ – $3,2$  мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>, у 2020 р. середнє значення підвищувалося до  $\approx 4,09$  мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>, максимальне – до 9,42 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>. Перманганатна окиснюваність зазвичай перебуває в межах  $\approx 9$ – $12$  мгО/дм<sup>3</sup> з епізодичним підвищенням до 15,68 мгО/дм<sup>3</sup> (2021 р.). Значення ХСК у більшості спостережень лежать у діапазоні  $\approx 20$ – $50$  мгО/дм<sup>3</sup>. Аніонні ПАР становлять  $\approx 0,024$ – $0,042$  мг/дм<sup>3</sup> (максимум 0,110 мг/дм<sup>3</sup> у 2020 р.), нафтопродукти – не вище 0,01 мг/дм<sup>3</sup>.

Біогенне навантаження визначається сполуками азоту та фосфору і має чітку сезонність: навесні посилюється внесок змиву з водозбору, у межень – трансформація форм за високих температур і уповільненого водообміну. У 2017–2025 рр. концентрації NO<sub>3</sub><sup>-</sup> змінюються в межах 0,10–10,97 мг/дм<sup>3</sup>; NH<sub>4</sub><sup>+</sup> має епізодичні підвищення до 0,536 мг/дм<sup>3</sup> (максимум у 2025 р.). Для фосфорного блоку характерні підвищені рівні: поліфосфати у 2019–2021 рр. у середньому  $\approx 0,86$ – $1,22$  мг/дм<sup>3</sup> (максимум 2,404 мг/дм<sup>3</sup> у 2021 р.), загальний фосфор – 0,051–1,016 мг/дм<sup>3</sup> (підвищені середні у 2020–2021 рр.  $\approx 0,445$ – $0,491$  мг/дм<sup>3</sup>), що підтверджує високий евтрофікаційний потенціал.

Температурний режим за 2017–2025 рр. характеризується швидким весняним прогріванням і високими літніми температурами: у квітні  $\approx 10,6$ °C (5,0–21,5°C), у червні  $\approx 22,4$ °C (19,0–26,6°C), у жовтні  $\approx 14,2$ °C (12,0–17,0°C), у серпні  $\approx 24,5$ °C (до 27°C). За маловодних і посушливих умов подовжується період високих температур, що зменшує розчинність кисню та прискорює мінералізацію органічної речовини, підвищуючи ймовірність локальних кисневих дефіцитів у межень.

Поряд із наведеними показниками, для оцінки ризиків суттєвими є також мікрокомпоненти (важкі метали), що відзначаються високою мінливістю та піковими значеннями. У 2017–2025 рр. концентрації становили: Cu – 0,0003–0,060 мг/дм<sup>3</sup>, Mn – 0,005–0,393 мг/дм<sup>3</sup>, Zn – 0,0001–0,810 мг/дм<sup>3</sup>, Ni – 0,001–0,130 мг/дм<sup>3</sup>, Fe (заг.) – 0,019–1,152 мг/дм<sup>3</sup>. Імовірними чинниками варіабельності є, з одного боку, зменшення розбавлення та посилення ролі

локальних надходжень і внутрішньоводоймних процесів у межень, з іншого – весняний поверхневий змив із водозбору та руслових наносів у роки достатньої водності. За зниження розчиненого кисню зростає ймовірність мобілізації частини елементів у придонній зоні та на межі «вода–донні відклади» внаслідок зміни окисно-відновних умов, що найчастіше проявляється підвищеною мінливістю Mn і Fe. Висока мінералізація та слабколужний рН впливають на форми міграції металів (комплексоутворення, сорбція на зважених частках), тому поєднання високого сольового фону, органічної речовини, теплого сезону та зниженого O<sub>2</sub> є потенційно несприятливим щодо токсикологічного навантаження на гідробіонтів.

Загалом гідрохімічний стан водосховища визначається поєднанням стійко підвищеного сольового фону, високого евтрофікаційного потенціалу та сезонної вразливості кисневого режиму, з тенденцією до загострення ризиків у маловодні/посушливі періоди.

Екологічну оцінку стану води Софіївського водосховища виконано на основі чинних вимог державного моніторингу масивів поверхневих вод [35]. З огляду на обмеженість референтних і попередньо встановлених показників біологічної компоненти, оцінювання екологічного стану водосховища наведено за хімічними та фізико-хімічними параметрами.

У таблиці 6 подано показники якості води, розраховані за річними та сезонними усередненнями для 2025 року з виділенням гідрологічних фаз: повінь і межень.

У відповідності до Методики [26] та вимог Додатка 21 Методики [27] виконано сезонну класову оцінку показників якості води Софіївського водосховища. Результати класифікації за окремими параметрами наведено в таблиці 7.

Інтегрально за сукупністю контрольованих показників вода водосховища у 2025 році відповідає III класу, що характеризує задовільний екологічний стан. При цьому розподіл показників за класами має полідомінантний характер і змінюється між гідрологічними фазами року, що відображає сезонну трансформацію гідрохімічного режиму.

У період весняної повені більшість параметрів демонструє відповідність більш високим класам якості, що узгоджується з ефектом розбавлення та оновлення водних мас. Водночас у цей період для частини показників фіксується погіршення класу, насамперед за компонентами біогенного/органічного навантаження, що визначає їх роль як лімітуючих для підсумкової оцінки.

У період межень підсилюється внесок внутрішньоводоймних процесів у формування якості води за умов високих температур і уповільненого водообміну; відповідно, зростає частка показників, що відповідають нижчим класам, передусім за характеристиками, пов'язаними з трофічністю та кисневим режимом.

Таблиця 6

## Сезонна характеристика якості води Софіївського водосховища за даними моніторингу в 2025 році

Контрольовані показники	Значення показників			
	Середньорічні	Максимальні значення за рік	Середні за період весняної повені	Середні за період літньо-осінньої межени
Температура води, °С	17,7	28,2	4,3	25,4
Електропровідність, мС/м	2118,8	2240	1638	2160
Водневий показник рН, од. рН	8,5	8,85	8,42	8,73
Розчинений кисень, мг О <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	8,3	18,32	13,96	9,34
Біологічне споживання кисню, мг О <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	3,7	6,56	2,23	5,76
Хімічне споживання кисню, мг О/дм <sup>3</sup>	32,8	42,21	24,10	31,75
Азот амонійний, мг N/дм <sup>3</sup>	0,183	0,536	0,177	0,025
Азот нітратів, мг N/дм <sup>3</sup>	0,801	4,140	1,810	0,260
Азот нітритів, мг N/дм <sup>3</sup>	0,024	0,047	0,031	0,011
Фосфор ортофосфатів, мг Р/дм <sup>3</sup>	0,569	1,164	0,375	0,731
Фосфор загальний, мг Р/дм <sup>3</sup>	0,301	0,460	0,240	0,239

Таблиця 7

## Сезонна відповідність показників якості води Софіївського водосховища критеріям класів екологічного стану впродовж 2025 року

Контрольовані показники	Значення показників			
	Середньорічні	Максимальні значення за рік	Середні за період весняної повені	Середні за період літньо-осінньої межени
Температура води, °С	I	III	I	II
Електропровідність, мС/м	III	III	III	III
Водневий показник рН, од. рН	III	III	I	I
Розчинений кисень, мг О <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	I	I	I	II
Біологічне споживання кисню, мг О <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	II	III	I	II
Хімічне споживання кисню, мг О/дм <sup>3</sup>	I	II	I	II
Азот амонійний, мг N/дм <sup>3</sup>	I	II	I	I
Азот нітратів, мг N/дм <sup>3</sup>	III	III	III	I
Азот нітритів, мг N/дм <sup>3</sup>	I	I	I	I
Фосфор ортофосфатів, мг Р/дм <sup>3</sup>	III	III	III	III
Фосфор загальний, мг Р/дм <sup>3</sup>	III	III	III	III
Клас стану	<b>III</b>	<b>III</b>	<b>III</b>	<b>III</b>
Екологічний стан річки	<b>задовільний</b>	<b>задовільний</b>	<b>задовільний</b>	<b>задовільний</b>

Отже, за результатами класової оцінки добрий екологічний стан водойми не досягнуто. Визначені сезонні лімітуючі показники потребують посиленого контролю та врахування під час обґрунтування водоохоронних заходів.

Хімічний стан Софіївського водосховища оцінено за пріоритетними речовинами шляхом зіставлення фактичних концентрацій у воді з екологічними нормативами якості (ЕНЯ<sub>сер</sub> та ЕНЯ<sub>макс</sub>). У більшості випадків вміст пріоритетних речовин відповідав установленим значенням ЕНЯ. Водночас у 2021–2022 рр. зафіксовано перевищення ЕНЯ<sub>макс</sub> для нікелю у 1,1–3,8 рази. У листопаді 2025 року зареєстровано одноразове перевищення ЕНЯ<sub>макс</sub> у 4 рази для ендосульфату (органохлорного пестициду), що може свідчити про епізодичне пестицидне надходження зі стоком з водозбору. З огляду на зафіксовані перевищення екологічних нормативів, добрий хімічний стан за наявними даними не підтверджено.

**Висновки.** Проведене дослідження підтвердило, що Софіївське водосховище р. Інгул є функціонально важливим водним об'єктом посушливої степової зони та вододжерелом питного водопостачання, тому його стан має оцінюватися з урахуванням сезонної мінливості гідрологічних і гідрохімічних процесів. Узагальнення багаторічних лабораторних даних 2017–2025 рр. у поєднанні з матеріалами власних польових обстежень у межах водосховища та на річці вище за течією дало змогу окреслити ключові риси сучасного режиму якості води: переважання сульфатно-хлоридно-натрієвого типу з підвищеною мінералізацією та жорсткістю, слабколузну реак-

цію середовища й підвищену електропровідність за наявності карбонатної буферності. Встановлено, що у весняний період домінують процеси оновлення та розбавлення водних мас, тоді як у межень за умов високих температур і уповільненого водообміну зростає роль внутрішньоводоймних процесів і підвищуються ризики погіршення кисневого режиму, що потребує посилення контролю саме в критичні маловодні періоди. За результатами оцінювання за гідроморфологічними, фізико-хімічними та хімічними показниками вода Софіївського водосховища у 2025 році інтегрально відповідає III класу (задовільний стан). Як пріоритетні для практично орієнтованого моніторингу та планування водоохоронних заходів доцільно розглядати електропровідність, сполуки фосфору й азоту та показники органічного забруднення, оскільки саме вони виступають сезонно-лімітуючими параметрами якості води. З урахуванням результатів оцінки пріоритетних речовин добрий хімічний стан за наявними даними не підтверджено.

**Перспективи використання результатів дослідження.** Отримані висновки можуть бути використані як аналітична основа для планування та обґрунтування водоохоронних заходів, спрямованих на досягнення доброго екологічного стану водного об'єкта, а також для подальшого оцінювання ефективності таких заходів.

**Вираз вдячності.** Автори щиро дякують працівникам Регіонального офісу водних ресурсів у Миколаївській області за консультації, допомогу у проведенні польових і лабораторних досліджень та поради в редактуванні статті.

### Література

1. Вишневський В. І. Річки і водойми України: стан і використання. Київ, 2000. 376 с.
2. Письменний С. М., Грищенко А. В., Туз Р. В. Водний фонд Миколаївської області : довідк. вид. 3-тє вид. Миколаїв : ФОП Швец В. М., 2018. 167 с.
3. Хільчевський В. К. Водні ресурси та якість річкових вод басейну Південного Бугу. Київ : Ніка-Центр, 2009. 183 с.
4. Магась Н. І. Характеристика природних та кліматичних умов формування сучасного гідроекологічного стану в пониззі річки Синюха. Екологічні науки. 2024. № 4(55). С. 59–69.
5. Магась Н. І. Оцінка сучасного стану та рівня екологічної безпеки річкових вод у басейні Південного Бугу на території Миколаївської області. Екологія. Довкілля. Енергозбереження : колект. монографія / за ред. О. Е. Ілляш. Полтава : Нац. ун-т «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2024. С. 17–30.
6. Дані державного обліку водокористування за формою № 2ТП-водгосп (річна) / Державне агентство водних ресурсів України. URL: [https:// e-services.davr.gov.ua](https://e-services.davr.gov.ua) (дата звернення: 05.10.2025).
7. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Миколаївській області у 2024 році / Управління екології та природних ресурсів Миколаївської обласної державної адміністрації. Миколаїв, 2024. URL: <https://ecolog.mk.gov.ua/ua/ecoreports/regionalreport/> (дата звернення: 05.01.2026).
8. Водний кодекс України : Кодекс України від 06.06.1995 № 213/95-ВР. Відомості Верховної Ради України. 1995. № 24. Ст. 189. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/213/95-%D0%B2%D1%80> (дата звернення: 05.01.2026).
9. Регіональний офіс водних ресурсів у Миколаївській області. Водні ресурси. URL: <https://mk-vodres.davr.gov.ua/2010-10-25-12-51-17> (дата звернення: 03.01.2026).
10. Водний фонд України: штучні водойми – водосховища і ставки : довідник / за ред. В. К. Хільчевського, В. В. Гребеня. Київ : Інтерпрес, 2014. 164 с.
11. Паламарчук М. М., Закорчевна Н. Б. Водний фонд України : довідк. посіб. / за ред. В. М. Хорєва, К. А. Алієва. Київ : Ніка-Центр, 2001. 392 с.
12. Кривульченко А. І. Водні об'єкти Кіровоградської області : монографія : у 2 ч. Кіровоград : Імекс-ЛТД, 2011. 356 с.
13. Альохіна Т. М. Особливості хімічного складу донних відкладів Карачунівського та Софіївського водосховищ (Україна). Гідробіологічний журнал. 2016. Т. 52, № 4. С. 103–111.

14. Ільїн Ю. П. Середній стан та сезонна мінливість структури і динаміки перехідних вод Дніпровсько-Бузької гирлової області. Український гідрометеорологічний журнал. 2023. 32. С. 63-79.
15. Хільчевський В. К., Гребінь В. В. Великі і малі водосховища України: регіональні та басейнові особливості поширення. Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. 2021. № 2. С. 6–17.
16. Пилипенко Ю. В. Екологія малих водосховищ степу України : монографія. Херсон : Олді-плюс, 2007. 303 с.
17. Про схвалення Водної стратегії України на період до 2050 року : розпорядження Кабінету Міністрів України від 09.12.2022 № 1134-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1134-2022-%D1%80#Text> (дата звернення: 11.10.2025).
18. Про затвердження обласної Програми «Питна вода Миколаївщини» на 2021–2025 роки : рішення Миколаївської обласної ради від 29.09.2021 № 4. URL: <https://mk-oblrada.gov.ua/UserFiles/decree/1633434255615c3a8f16115.pdf> (дата звернення: 11.10.2025).
19. Котляр Ю. В. Історична географія. Спецкурс з історії : навч. посіб. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2017. 216 с.
20. Ласінська М. Ю. Історіографія досліджень сарматських археологічних пам'яток регіону Нижнього Побужжя. Чорноморський літопис. 2011. № 4. С. 118–122.
21. Україна на стародавніх картах : кінець XV – перша половина XVII ст. / М. Г. Вавричин та ін. Київ : ДНВП «Картографія», 2004. 208 с.
22. Стельмах В. Ю., Мельничук М. М. Гідрографія України : конспект лекцій : метод. розробка для студентів географічного факультету / Волинський національний університет імені Лесі Українки, географічний факультет, кафедра фізичної географії. Луцьк. 2022. 121 с.
23. Екологія Миколаївської області : монографія / І. В. Наконечний, І. О. Мазур, Г. Г. Трохименко, С. М. Літвак, Ю. О. Наконечна, С. В. Мельничук, Ю. Г. Дмитрук, Ю. В. Сушко, І. О. Щербина ; за ред. І. В. Наконечного. – Миколаїв : НУК, 2022. – 313 с.
24. Винокуров Д. С. Синтаксономія вищої водної рослинності долини р. Інгул. Чорноморський ботанічний журнал. 2011. Т. 7, № 1. С. 26–40.
25. Винокуров Д. С. Созофіти долини р. Інгул і завдання їх охорони. Вісник Львівського університету. Серія біологічна. 2014. Вип. 65. С. 135–150.
26. Про затвердження Методики визначення масивів поверхневих та підземних вод : наказ Міністерства екології та природних ресурсів України від 14.01.2019 № 4. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0287-19#Text> (дата звернення: 12.12.2025).
27. Про затвердження Методики віднесення масиву поверхневих вод до одного з класів екологічного та хімічного станів масиву поверхневих вод, а також віднесення штучного або істотно зміненого масиву поверхневих вод до одного з класів екологічного потенціалу штучного або істотно зміненого масиву поверхневих вод : наказ Міністерства екології та природних ресурсів України від 14.01.2019 № 5. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0127-19#n14> (дата звернення: 13.12.2025).
28. Про затвердження екологічних нормативів якості води для визначення екологічного стану масиву поверхневих вод та Змін до деяких нормативно-правових актів Міністерства екології та природних ресурсів України : наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 01.04.2024 № 332. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0789-24#Text> (дата звернення: 12.12.2025).
29. Барщевська Н. М. Аналіз новітньої геодинаміки в зв'язку з формуванням рельєфу території басейну р. Інгул. Фізична географія та геоморфологія. 2014. Вип. 2(74). С. 94–103.
30. Басейн річки Інгул : електронна карта. URL: [http://mapexpert.com.ua/#google\\_vignette](http://mapexpert.com.ua/#google_vignette) (дата звернення: 06.09.2025).
31. Карти Генштабу України з прив'язкою для GPS. Квадрат L-36-5. URL: <https://freemap.com.ua/karty-ukrainy/karty-genshtaba/karta-genshtaba-kvadrat-l-36-5/> (дата звернення: 03.01.2026).
32. Правила експлуатації Софіївського водосховища Новобузького району Миколаївської області. Миколаїв, 2008. 37 с.
33. Барщевська Н. М. Четвертинний покрив та палеогеографічні умови формування відкладів території басейну річки Інгул. Укр. геогр. журн. 2015. № 1.
34. Миколаївська обласна рада. Рішення від 17.12.2002 № 6 «Про створення об'єкта природно-заповідного фонду місцевого значення регіонального ландшафтного парку «Приінгульський». URL: <https://mk-oblrada.gov.ua/UserFiles/decree/15136830455a38f86503087.doc> (дата звернення: 03.01.2026).
35. Регіональний ландшафтний парк «Приінгульський». Літопис природи. Т. IX. 2016. 83 с. URL: <https://ecolog.mk.gov.ua/store/files/file/litopis-9-2016.pdf> (дата звернення: 03.01.2026).
36. Порядок здійснення державного моніторингу вод : Постанова Кабінету міністрів України від 19.09.2018 р. № 758. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/758-2018-%D0%BF#Text> (дата звернення: 13.12.2025).

Дата першого надходження статті до видання: 27.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026

# EUTROPHICATION OF THE ODESA COASTAL WATERS BEFORE AND AFTER THE ONSET OF THE FULL-SCALE WAR: ASSESSMENT USING INDIVIDUAL AND COMPLEX INDICATORS FOR 2019–2025

Titiapkyn A.S.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Ukrainian Scientific Centre of Ecology of the Sea  
Frantsuzsky Blvd. 89, 65009, Odesa

<sup>2</sup>Institute of Marine Biology of the NAS of Ukraine  
Udilny lane, 6, 65012, Odesa  
tityapkin@ukr.net

Eutrophication of coastal marine waters remains one of the key environmental problems of the north-western part of the Black Sea, determining the ecological status of coastal ecosystems and limiting the recreational use of marine areas. In recent years, traditional eutrophication drivers have been supplemented by new forms of anthropogenic impact associated with military activities, disruption of the hydrological regime, and degradation of wastewater infrastructure. The coastal waters of the city of Odesa are particularly vulnerable to these changes, as they are continuously influenced by riverine, estuarine, and urban runoff.

This study presents the results of a comprehensive assessment of eutrophication in the coastal waters of the city of Odesa over a seven-year period (2019–2025), with a focus on the pre-war (2019–2021) and wartime (2022–2025) stages. The analysis is based on data from regular hydrochemical and hydrobiological monitoring conducted by the Ukrainian Scientific Center of Ecology of the Sea, using complex indicators of trophic status and water quality, namely TRIX and EQR (BEAST).

It was established that during the pre-war period the coastal waters of Odesa were characterized by relative stability of indicators and a gradual decrease in the level of eutrophication, corresponding to a moderate trophic status. After the onset of the full-scale war, a disruption of pre-war trends was recorded, along with increased variability of hydrochemical parameters and deterioration of water quality caused by enhanced inputs of nutrients, primarily organic forms of nitrogen. The assessment results based on the complex indicators TRIX and EQR (BEAST) are consistent with each other and confirm a transition of the coastal marine waters of Odesa in 2024–2025 to a high trophic status, which does not correspond to a good ecological status.

The study results indicate a significant impact of wartime factors – particularly the destruction of hydraulic structures, reduced efficiency of wastewater treatment systems, and increased organic loading from estuarine and riverine waters – on eutrophication processes in the coastal waters of Odesa. The obtained assessments may be used to improve environmental monitoring systems and the management of coastal marine waters in the post-war period. *Key words:* eutrophication, coastal marine waters, the Black Sea, Odesa, nutrients, TRIX, EQR (BEAST), wartime impact.

## Евтрофікація прибережних вод м. Одеса до та після початку повномасштабної війни: оцінка за індивідуальними та комплексними показниками у 2019–2025 роках. Тітяпкин А.

Евтрофікація прибережних морських вод залишається однією з ключових екологічних проблем північно-західної частини Чорного моря, що визначає екологічний стан прибережних екосистем та обмежує рекреаційне використання акваторій. В останні роки традиційні чинники евтрофікації доповнилися новими формами антропогенного впливу, пов'язаними з воєнними діями, порушенням гідрологічного режиму та деградацією інфраструктури водовідведення. Особливо вразливими до таких змін є прибережні води м. Одеса, які перебувають під постійним впливом річкового, лиманного та міського стоку.

В роботі наведено результати комплексної оцінки евтрофікації прибережних вод м. Одеса за семирічний період 2019–2025 рр. з акцентом на довоєнний (2019–2021) та воєнний (2022–2025) етапи. Аналіз виконано на основі даних регулярного гідрохімічного та гідробіологічного моніторингу, який проводиться Українським науковим центром екології моря, із застосуванням інтегральних показників трофності та якості вод TRIX і EQR (BEAST).

Встановлено, що у довоєнний період прибережні води Одеси характеризувалися відносною стабільністю показників та поступовим зниженням рівня евтрофікації, що відповідало середньому рівню трофності. Після початку повномасштабної війни зафіксовано порушення довоєнних тенденцій, зростання мінливості гідрохімічних показників і погіршення якості вод, зумовлене підвищенням надходження біогенних речовин, насамперед органічних форм азоту. Результати оцінки за комплексними показниками TRIX і EQR (BEAST) узгоджуються між собою та підтверджують перехід прибережних морських вод м. Одеса у 2024–2025 рр. до високого рівня трофності, що не відповідає доброму екологічному стану.

Результати дослідження свідчать про суттєвий вплив воєнних чинників, зокрема руйнування гідротехнічних споруд, зниження ефективності очисних систем та збільшення органічного навантаження з лиманних і річкових вод, на процеси евтрофікації прибережних вод м. Одеси. Отримані оцінки можуть бути використані для вдосконалення системи екологічного моніторингу та управління прибережними морськими водами в післявоєнний період. *Ключові слова:* евтрофікація, прибережні морські води, Чорне море, Одеса, біогенні речовини, TRIX, EQR (BEAST), воєнний вплив.



**Problem statement.** The problem of eutrophication of coastal marine waters is one of the most complex issues in the system of quality management of the Black Sea marine environment. Inputs of nutrients lead to disruption of trophic balance, excessive phytoplankton development, intensification of water “blooming” processes, reduced water transparency, oxygen depletion (formation of hypoxic and anoxic zones in the near-bottom layer), and ecosystem degradation. Under current conditions, traditional sources of eutrophication are supplemented by wartime factors, the impact of which on marine ecosystems remains insufficiently studied.

**Relevance of the study.** The relevance of this study is determined by the need to assess the ecological status of coastal waters under conditions of armed conflict and limited monitoring. Understanding the changes that have occurred since 2022 is critically important for predicting the future dynamics of eutrophication and for developing effective marine environment management measures.

**Connection of the author’s work with significant scientific and practical tasks.** The study was conducted within the framework of implementing the provisions of the EU Water Framework Directive [1] and the Marine Strategy Framework Directive [2, 3] aimed at achieving good ecological status of marine waters. The results obtained have practical significance for the national environmental monitoring system and for assessing the ecological consequences of wartime activities.

**Analysis of recent research and publications.** Previous studies have primarily addressed eutrophication of coastal waters in the north-western part of the Black Sea in the context of riverine runoff [4], urbanization [5-8], and climate change [9-12]. A large number of recent works have focused on the biogeochemical response of the north-western Black Sea to the breach of the Kakhovka HPP dam, using combined approaches that integrate satellite observations, hydrological modeling, and field measurements, e.g., [13, 14]. At the same time, the impact of wartime factors on nutrient loading and eutrophication patterns has been scarcely analyzed.

**Identification of previously unresolved aspects of the overall problem.** Insufficiently studied are the issues of the transformation of the ratio between mineral and organic forms of nutrients, as well as the sensitivity of complex water quality indicators to wartime factors.

**Novelty.** The novelty of the study lies in the quantitative assessment of changes in eutrophication of the coastal waters of Odesa before and after the onset of the full-scale war, using two independent complex indicators and analyzing the role of the organic component of nutrient loading.

**Methodological or general scientific significance.** The study demonstrates the feasibility of applying the complex indicators TRIX and EQR (BEAST) under conditions of limited monitoring and can be used as a methodological approach for assessing the ecological status of coastal marine waters in crisis situations.

## **Presentation of the main material.**

### **Materials and Methods**

The study was conducted for the coastal waters of the north-western part of the Black Sea within the recreational zone of the city of Odesa, corresponding to the coastal water body CW5 according to the Marine Conservation Strategy of Ukraine [15]. The analysis covers a seven-year period from 2019 to 2025, including the pre-war (2019–2021) and wartime (2022–2025) stages, which allowed for the assessment of transformations in eutrophication processes under the influence of changes in anthropogenic pressure.

The study was based on data from regular environmental monitoring of coastal waters conducted by the Ukrainian Scientific Center of Marine Ecology, with a weekly sampling frequency at fixed stations located in the areas of Arkadia Beach, Cape Malyi Fontan, and the Odesa Yacht Club (Fig. 1). The work utilized results from hydrochemical and hydrobiological measurements. Eutrophication status was assessed using indicators of nutrient content (concentrations of mineral and total forms of nitrogen, phosphorus and Silicon (TP, P(PO<sub>4</sub>), TN, N(NO<sub>2</sub>), N(NO<sub>3</sub>), N(NH<sub>4</sub>), Si(SiO<sub>4</sub>))), chlorophyll-a concentration (Chl-a), dissolved oxygen (DO), and supporting abiotic parameters such as biochemical oxygen demand (BOD) and pH.

The complex assessment of eutrophication and water quality was carried out using the TRIX trophic index [16-18], which combines indicators of chlorophyll-a concentration, deviation of oxygen saturation from 100%, concentrations of mineral forms of nitrogen, and total phosphorus. The TRIX index was calculated for each measurement set, followed by averaging across temporal and spatial scales, allowing for the determination of intra-annual and inter-annual variability of trophic status in the coastal waters.

Additionally, the BEAST (HEAT-3.0) methodology [19, 20], recommended for the Black Sea area, was applied to assess the ecological status of marine waters. Within this approach, the dimensionless water quality ratio (EQR) was determined based on the ratio of observed indicator values to target values corresponding to good ecological status. The calculations included groups of indicators for inorganic forms of nitrogen and phosphorus, primary production (chlorophyll-a), and oxygen regime. The final assessment of eutrophication level was determined by the highest complex EQR value within the respective indicator groups.

Statistical analysis methods were applied to identify long-term changes and to perform a comparative analysis of the pre-war and wartime periods. The results obtained were used to interpret the impact of wartime factors on eutrophication processes in the coastal waters of Odesa.

### **Changes in abiotic parameters**

Analysis of abiotic parameters indicates a significant change in the hydrochemical regime of the coastal waters of Odesa after 2022 (Fig. 2).



Fig. 1. Location of monitoring stations in the coastal waters of Odesa

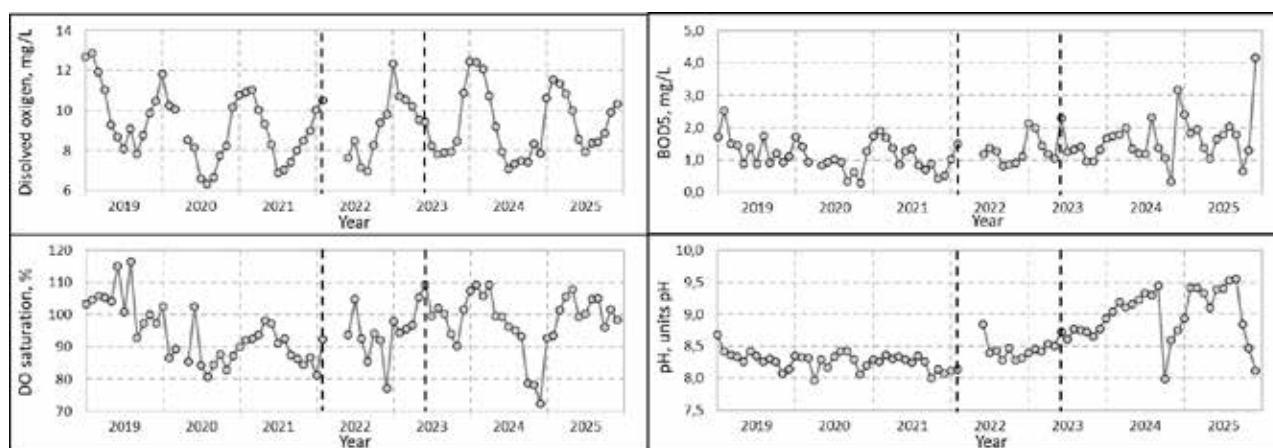


Fig. 2. Variability of monthly mean values of abiotic parameters

Note: Here and below, vertical lines indicate the onset of the full-scale war and the Kakhovka HPP disaster.

The oxygen regime of the coastal waters in 2019–2025 was characterized by relative stability and corresponded to good ecological status. Dissolved oxygen concentrations ranged from 4.0 mg/L to 15.7 mg/L (saturation from 35.0 % to 154.6 %). Annual mean values were 8.6–10.0 mg/L (saturation 88.8–104.0 %). Episodes of decreased oxygen content and saturation to critical levels were episodic and mostly occurred during the warm season. The lowest values were recorded at

the end of 2024 and 2025 (4.0 mg/L, 35.0 % saturation, and 4.1 mg/L, 51.6 % saturation, respectively), indicating episodic oxygen depletion events superimposed on generally well-oxygenated conditions. This is consistent with the tendency of the north-western shelf to short-term hypoxia under certain stratification conditions [21].

During the pre-war period, biochemical oxygen demand ( $BOD_5$ ) was characterized by moderate values typical for coastal waters with a medium trophic status.

In the wartime period, an increase in the frequency of exceedances of the maximum allowable BOD<sub>5</sub> value (3.0 mg/L) was observed, particularly in 2024–2025, indicating an increase in organic loading on the coastal waters.

Changes in pH also indicate a disruption of pre-war stability. During 2019–2021, average pH values mostly remained within the normative range for marine waters (6.5–8.5 pH units). In 2023–2025, a systematic increase in pH was observed, with frequent exceedances of the maximum allowable level (8.5 pH units), serving as an indirect indicator of intensified photosynthetic activity and water “blooming.” At the same time, a minimum pH value of 6.28 was recorded in 2024, indicating a short-term episode of water acidification against the background of overall increased alkalinity.

**Dynamics of nutrients and chlorophyll-a**

The most pronounced changes in the hydrochemical regime of the coastal waters of Odesa after 2022 are observed in nutrient indicators (Fig. 3).

During the pre-war period, concentrations of phosphate and total phosphorus in the coastal waters of Odesa showed a tendency toward stabilization or gradual decline, consistent with long-term trends observed in the early 21st century [11, 12]. Annual mean phosphate phosphorus values (10.7–19.2 µg/L) corresponded to good ecological status, while elevated concentrations

were seasonal and mostly recorded in the autumn–winter period. After 2022, the variability pattern of phosphorus changed. Although annual mean phosphate phosphorus values in 2023–2025 generally remained close to pre-war levels, the frequency of high total phosphorus concentrations, corresponding to moderate and poor ecological statuses, increased. This indicates a rise in the proportion of the organic component of phosphorus in the overall nutrient balance. Overall, phosphate phosphorus values ranged from <0.5 to 113 µg/L, while total phosphorus ranged from 7 to 716 µg/L.

The most pronounced changes were recorded for nitrogen compounds. In 2019–2021, the total content of mineral forms of nitrogen was characterized by relative stability and a gradual decreasing trend, consistent with long-term patterns [11, 12]. In contrast, during the wartime period, concentrations of both mineral nitrogen forms and total nitrogen sharply increased. Nitrite nitrogen ranged from <0.5 to 24.2 µg/L, nitrate nitrogen from <5 to 1,995 µg/L, ammonium nitrogen from <15 to 245 µg/L, and total nitrogen from 97 to 72,628 µg/L. Particularly notable is the anomalous increase in total nitrogen in 2024–2025, largely due to a rise in its organic component.

The ratio of organic to mineral forms of nitrogen and phosphorus changed significantly after 2022 (Fig. 4). During the pre-war period, mineral forms of nitrogen,

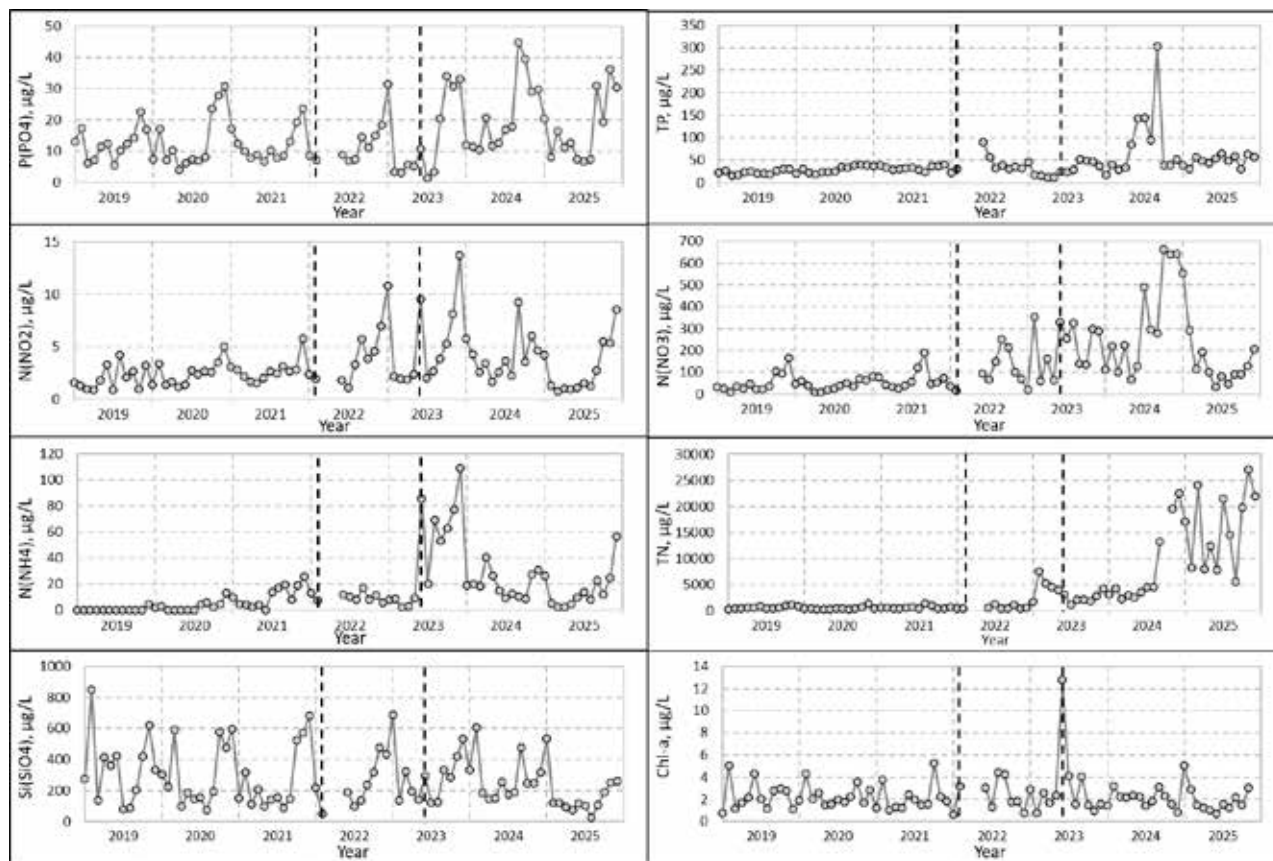


Fig. 3. Variability of monthly mean values of nutrients and chlorophyll-a

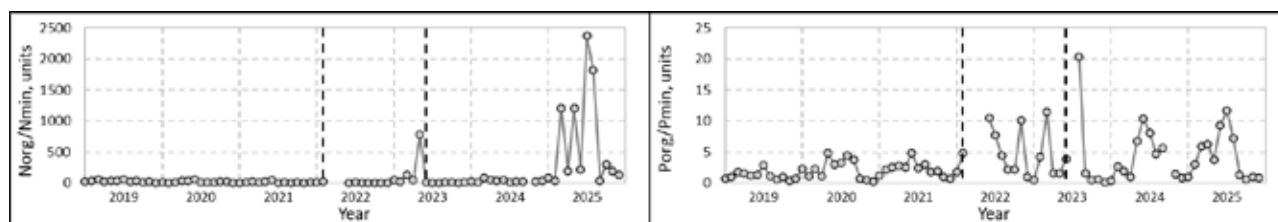


Fig. 4. Monthly dynamics of the ratios of organic to mineral forms of nitrogen and phosphorus

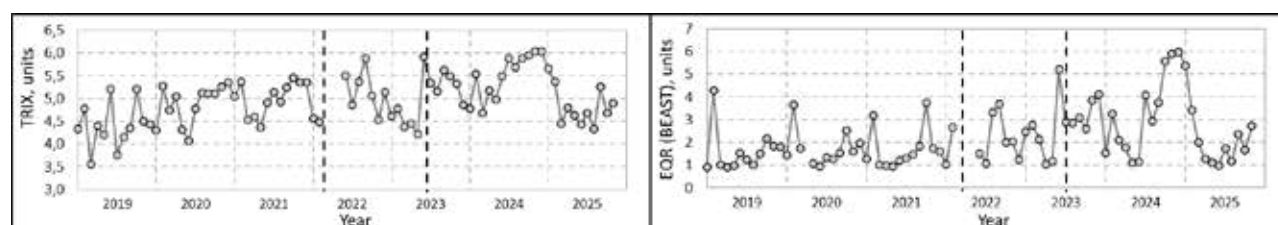


Fig. 5. Monthly dynamics of the complex indicators TRIX and EQR

typical of controlled anthropogenic influence, predominated. In the wartime period, however, the role of organic forms sharply increased, coming from estuarine and riverine waters, as well as due to disruption of wastewater treatment system functioning.

Silicon ( $\text{Si}(\text{SiO}_4)$ ) concentrations in the coastal waters of Odesa ranged from  $<10$  to  $2,465 \mu\text{g/L}$ . Annual mean values for 2019–2025 were  $149$ – $344 \mu\text{g/L}$  and showed a decreasing trend, which to some extent limits the development of diatom algae.

No pronounced changes in chlorophyll-*a* concentrations were observed in the coastal zone of Odesa throughout the study period. Changes in chlorophyll-*a*, as an indicator of phytoplankton biomass, reflect variations in the ecological status of the aquatic environment. Overall, this dynamics corresponds to the characteristic seasonal pattern of the north-western shelf. Peaks in chlorophyll-*a* concentrations were usually observed in spring and summer, associated with increased phytoplankton photosynthetic activity under elevated temperatures and enhanced riverine nutrient input. During other seasons, particularly autumn and winter, chlorophyll-*a* levels remained consistently low, generally not exceeding  $2$ – $5 \mu\text{g/L}$ . The maximum chlorophyll-*a* value recorded during the entire observation period was  $35 \mu\text{g/L}$  at the beginning of June 2023, which was linked to the Kakhovka HPP disaster.

#### **Assessment of eutrophication in coastal waters using complex indicators TRIX and EQR (BEAST)**

Calculations of the TRIX trophic index and the EQR (BEAST) water quality indicator allowed for the synthesis of hydrochemical and hydrobiological observations and the identification of changes in the degree of eutrophication over the study period.

Before the onset of the full-scale war, annual mean TRIX values in the coastal waters of Odesa ranged from  $4.4$  to  $5.0$ , corresponding to the border between moder-

ate and high trophic status, with water quality assessed as good or moderate. After the war began, TRIX values increased to  $5.0$ – $5.4$ , corresponding to high trophic status (moderate water quality). Intra-annual fluctuations of the index were moderate and exhibited a clearly defined seasonal pattern (Fig. 5).

The assessment results using the BEAST methodology complement and confirm the conclusions obtained based on the TRIX index. During the pre-war period, annual mean EQR values of  $1.6$ – $1.8$  in the coastal waters of Odesa corresponded to a moderate ecological status, while in the wartime period they indicated poor status, ranging from  $2.1$  to  $3.1$ . Maximum EQR values were recorded during periods of increased nutrient loading and intense water “blooming,” consistent with hydrochemical observations.

The observed changes in TRIX and EQR (BEAST) indicators are well aligned with the dynamics of nutrient concentrations and indicate relative stability of the coastal ecosystem prior to the onset of the full-scale war. After the war began, the annual mean values of both indicators no longer corresponded to good ecological status, reflecting an overall deterioration in the quality of coastal waters.

**Main conclusions.** During the wartime period, a significant deterioration of the ecological status of the coastal waters of Odesa was observed, driven by increased organic nutrient loading and disruption of the oxygen regime. The most pronounced changes were recorded for total nitrogen and its organic component, confirming the informativeness of this indicator for assessing the impact of wartime factors. The application of two independent integrated assessment methods, TRIX and EQR (BEAST), allowed for a consistent evaluation of eutrophication processes and confirmed a substantial decline in the condition of coastal waters during the wartime period compared to the pre-war

stage. The observed changes in these indicators are well aligned with nutrient dynamics and indicate relative stability of the coastal ecosystem prior to the onset of the full-scale war.

**Prospects for the application of the study results.** The results obtained can be used to improve marine water monitoring systems, develop adaptive measures in the post-war period, and assess ecological risks for coastal areas.

### References

1. Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008 (Marine Strategy Framework Directive). Official Journal of the European Union 25.6.2008. L164/19 – L164/40. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0056>. (Last accessed: 30.01.2026)
2. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 (Water policy). Official Journal of the European Communities L 327/1 – 327/72, 22.12.2000. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32000L0060>. (Last accessed: 30.01.2026)
3. Commission Decision (EU) 2017/848 of 17 May 2017 laying down criteria and methodological standards on good environmental status of marine waters and specifications and standardised methods for monitoring and assessment, and repealing Decision 2010/477/EU. Official Journal of the European Union 18.5.2017 – L125/43 – L125/74 URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017D0848>. (Last accessed: 30.01.2026)
4. Лобода П.С., Тучковенко Ю. С. Дослідження впливу змін річкового стоку за кліматичними сценаріями на гідроекологічний стан північно-західної частини Чорного моря. *Наук. зап. Терноп. нац. пед. ун-ту. Сер. Біол.* 2010. № 3 (44). С. 360–365.
5. Тучковенко Ю. С., Сапко О. Ю. Станції біологічного очищення стічних вод мегаполісу Одеса як джерело біогенного забруднення морського середовища. *VII-й Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю (Екологія/Ecology–2019)* : збірник наук. праць, 25–27 вересня 2019. Вінниця : ВНТУ, 2019. С. 78.
6. Тучковенко Ю. С., Сапко О. Ю., Тучковенко О. А. Характеристика станцій біологічного очищення стічних вод міста Одеса як джерел біогенного забруднення морського середовища в сучасний період. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2020. № 25. С. 127-135. doi:10.31481/uhmj.25.2020.12
7. Тучковенко Ю. С., Сапко О. Ю. Станції біологічного очищення стічних вод міста Одеса як джерела забруднення морського середовища. *Maritime security of the Baltic-Black sea region: challenges and threats* : conference proceedings. December 23, 2021. Vol. 1. Riga, Latvia : Baltija Publishing. 2021. С. 28-31.
8. Скок С. В. Оцінка екологічного стану морських екосистем (на прикладі Одеської затоки). *Водні біоресурси та аквакультура*. 2023. № 1(13). С. 175-187. DOI <https://doi.org/10.32851/wba.2023.1.13>
9. Тітяпкин А. С., Український В. В. Щодо методів комплексної оцінки стану евтрофікації та якості морських вод. *Євроінтеграція екологічної політики України* : матеріали Третьої Всеукр. наук.-практ. конф., 20 жовтня 2021 р., Одеса : ОДЕКУ. 2021. С. 57-64.
10. Тучковенко Ю.С. Комплексне вирішення проблеми забезпечення доброго екологічного стану морського середовища на прилеглий до північної частини міста Одеса ділянці узбережжя. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2023. № 31. С. 22-32. <https://doi.org/10.31481/uhmj.31.2023.02>
11. Соборова О.М. Актуальні аспекти евтрофікації вод Одеської затоки. *Водні біоресурси та аквакультура*. 2018. № 1. С. 59–68.
12. Тітяпкин А.С. Сучасний стан евтрофікації вод Одеського регіону північно-західної частини Чорного моря. *Євроінтеграція екологічної політики України* : матеріали Сьомої Всеукр. наук.-практ. конф. 4–5 листоп. 2025 р. Одеса : Одес. нац. ун-т ім. І. І. Мечникова, 2025. С. 198-202.
13. Jiang D., Khokhlov V., Tuchkovenko Y. *et al.* The biogeochemical response of the north-western Black Sea to the Kakhovka Dam breach. *Communications Earth & Environment*. 2025. 6. 185. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02153-z>.
14. Tuchkovenko Yu. S., Kushnir D.V., Torgonskyi A.V., Komorin V.M. The impact of the destruction of the Kakhovka reservoir dam on the oceanographic conditions in the north-western part of the Black Sea according to the results of modeling. *Ukrainian hydrometeorological journal*. 2024. 33. P. 66-80. <https://doi.org/10.31481/uhmj.33.2024.05>
15. Морська природоохоронна стратегія України. Схвалено Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 11 жовтня 2021 р. № 1240-р. Київ. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1240-2021-%D1%80?lang=uk#Text> (дата звернення: 30.01.2026).
16. Vollenweider R. A., Giovanardi F., Montanari G., Rinaldi A. Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the NW Adriatic Sea: proposal for a trophic scale turbidity and generalized water quality index. *Environmetrics*. 1998. № 9. P. 329–357. URL: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-095X\(199805/06\)9:3<329::AID-ENV308>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-095X(199805/06)9:3<329::AID-ENV308>3.0.CO;2-9)
17. Vollenweider R. A., Kerekes J. J. Eutrophication of waters: monitoring assessment and control. Paris: OECD, 1982. 154 p.
18. Moncheva S., Doncheva V. Eutrophication index (E) TRIX) – an operational tool for the Black Sea coastal water ecological quality assessment and monitoring. *The Black Sea ecological problems* : conf. paper. Odessa, SCSEIO. 2000. P. 178–185.
19. Andersen J. H., Axe P., Backer H., Carstensen J. *and other.* Getting the measure of eutrophication in the Baltic sea: towards improved assessment principles and methods. *Biogeochemistry*. 2011. № 106. P. 137–156. DOI 10.1007/s10533-010-9508-4.
20. Making Eutrophication Assessments Operational : EUTRO-OPER Final Report. HELCOM : Baltic Marine Environment Protection Commission, 2015. 142 p. URL: <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2019/11/EUTRO-OPER-project-report.pdf> (Last accessed: 30.01.2026).
21. Capet A., Barth A., Beckers J.-M., Grégoire M. Seasonal hypoxia in the Black Sea northwestern shelf. *Biogeosciences*. 2013. № 10. P. 3943-3962. doi:10.5194/bg-10-3943-2013.

Дата першого надходження статті до видання: 28.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026

## ЕКОТОКСИКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ҐРУНТІВ ПІСЛЯ РОЗМІНУВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕСТУ ГОСТРОЇ ТОКСИЧНОСТІ НА ЕМБРІОНАХ *DANIO RERIO*

Голембіовська О.І., Гребенюк Т.В., Федченко Є.П.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

пр. Берестейський, 37, 03056, Київ

[golembiovaska-fbmi@lil.kpi.ua](mailto:golembiovaska-fbmi@lil.kpi.ua), [t.hrebeniuk07@gmail.com](mailto:t.hrebeniuk07@gmail.com), [lizafeda@gmail.com](mailto:lizafeda@gmail.com)

У статті представлено результати екотоксикологічної оцінки ґрунтів, забруднених залишками вибухових речовин і нафтопродуктів унаслідок детонації вибухонебезпечних предметів у процесі гуманітарного розмінування територій. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю комплексного екологічного контролю стану ґрунтового та водного середовищ у зонах бойових дій, де після проведення робіт з розмінування можливе накопичення токсичних сполук, зокрема важких металів і продуктів вибуху, що становлять потенційну загрозу для живих організмів та екосистем.

У ході досліджень встановлено значне перевищення гранично допустимих концентрацій свинцю, нікелю, кадмію, хрому та цинку у ґрунтах досліджуваних ділянок. Для оцінки гострої токсичності забрудненого середовища застосовано біотестування на ембріонах риб *Danio rerio* (зебрафіш) відповідно до міжнародної методики OECD Guideline 236 “Fish Embryo Acute Toxicity (FET) Test”. Методика була адаптована та валідована для умов лабораторії, що підтверджено відповідними показниками відтворюваності та чутливості тесту з використанням референтної сполуки 3,4-дихлораніліну.

Отримані результати свідчать про чітку дозо- та часозалежну токсичну дію ґрунтових екстрактів, особливо зразків після вибуху, що проявлялася у зниженні виживаності ембріонів та збільшенні рівня летальності порівняно з негативним контролем.

Доведено, що застосований біотест є чутливим інструментом для оцінки екологічних ризиків, пов’язаних із розмінуванням забруднених територій. Отримані дані підтверджують доцільність використання тесту *Danio rerio* для екотоксикологічного моніторингу ґрунтів і водних екстрактів у зонах впливу вибухових залишків. Результати дослідження можуть бути використані для розроблення систем екологічного супроводу гуманітарного розмінування, оцінки безпечності територій після очищення та прийняття управлінських рішень у сфері відновлення довкілля. *Ключові слова:* гуманітарне розмінування; екотоксикологічна оцінка; вибухові залишки; важкі метали; гостра токсичність; біотестування.

### Ecotoxicological assessment of soils after mining using the acute toxicity test on danio rerio embryos. HOLEMBIOVSKA O., HREBENIUK T., FEDCHENKO YE.

The article presents the results of ecotoxicological assessment of soils contaminated with explosive residues and petroleum products as a result of the detonation of explosive objects in the process of humanitarian demining of territories. The relevance of the study is due to the need for comprehensive ecological monitoring of the state of soil and water environments in combat zones, where after demining work, the accumulation of toxic compounds, in particular heavy metals and explosion products, which pose a potential threat to living organisms and ecosystems, is possible.

During the research, a significant excess of the maximum permissible concentrations of lead, nickel, cadmium, chromium and zinc in the soils of the studied areas was established. To assess the acute toxicity of the contaminated environment, biotesting on *Danio rerio* fish embryos (zebrafish) was used in accordance with the international method OECD Guideline 236 “Fish Embryo Acute Toxicity (FET) Test”. The methodology was adapted and validated for laboratory conditions, as confirmed by the corresponding reproducibility and sensitivity of the test using the reference compound 3,4-dichloroaniline.

The results obtained indicate a clear dose- and time-dependent toxic effect of soil extracts, especially samples after the explosion, which was manifested in a decrease in embryo survival and an increase in the level of lethality compared to the negative control.

It has been proven that the applied bioassay is a sensitive tool for assessing environmental risks associated with the demining of contaminated areas. The obtained data confirm the feasibility of using the *Danio rerio* test for ecotoxicological monitoring of soils and water extracts in areas affected by explosive residues. The results of the study can be used to develop systems for ecological monitoring of humanitarian demining, assess the safety of areas after clearance and make management decisions in the field of environmental restoration. *Key words:* humanitarian demining; ecotoxicological assessment; explosive residues; heavy metals; acute toxicity; biotesting.



**Постановка проблеми.** На території України росією використовуються різні види зброї та боєприпасів, серед яких дрони, крилаті та балістичні ракети та міни різних типів [1]. В залежності від типу змінюється призначення, відповідно потужність вибуху та механізм роботи самих вибухонебезпечні предмети (ВНП). Їх використання несе руйнівні наслідки для навколишнього середовища через фізичний вплив та забруднення важкими металами, нафтопродуктами та іншими токсичними компонентами, які можуть містити ВНП.

**Актуальність дослідження.** Важкі метали здатні до біоаккумуляції та можуть накопичуватись уздовж трофічного ланцюга. Хоч деякі з них є важливими мікроелементами, у надлишкових концентраціях вони можуть мати багато негативних ефектів та спричинити різні хвороби у рослин, тварин і людей відповідно.

**Аналіз останніх досліджень.** Свинець (Pb) вражає центральну та периферичну нервову систему, оскільки НС є найбільш чутливим органом до впливу свинцю. Свинець негативно впливає на ріст, розмноження, метаболізм, нервову систему, розвиток та поведінку [2]. Свинець з поверхні ґрунту може інфільтруватись у підземні води, які слугують основним джерелом питної води для значної частини населення України.

Мідь (Cu) є життєвоважливим мікроелементом, необхідним для клітинних функцій, але є небезпечною у високих концентраціях: може відкладатися у печінці та викликати цироз печінки, також вражає нирки, мозок та інші органи. Хронічна токсичність асоційована із неврологічними та психічними розладами (тривожність, депресія, головні болі), ендокринними порушеннями (гіпотиреоз, діабет) [3].

Кадмій (Cd) є надзвичайно біостійким і може накопичуватись та залишатись в організмі протягом багатьох років після потрапляння до організму (біологічний період напіввиведення – 10-30 років). Даний метал може бути потенційним фактором ризику раку легень, нирок або простати. Для дії високих концентрацій кадмію характерна нефротоксичність, яка супроводжується пошкодженням ниркових каналців, каменів у нирках та глюкозурією. При хронічній інтоксикації кадмієм може зменшуватись поглинання кальцію в організмі, що тягне за собою демінералізацію скелету та остеопороз. Через тривалий вплив також виникають нейродегенеративні розлади [4].

Хром (Cr) може викликати мутації та рак через високу окислювальну здатність. Особливу небезпеку становить шестивалентний хром, оскільки він легше проникає в клітини в порівнянні із тривалентним хромом і здебільшого пов'язаний із канцерогенною активністю. Шестивалентний хром не має прямого токсичного впливу на гени, потрапляючи через систему транспорту сульфатів, він відновлюється до тривалентного хрому, а проміжні продукти, що утворюються під час відновлення і спричиняють

пошкодження ДНК. Відновлений хром реагує з фосфатними групами ДНК та перешкоджає нормальній реплікації та транскрипції, що спричиняє мутагенез, а також взаємодіє з певними групами ферментів [5].

Сполуки нікелю (Ni) класифіковані Міжнародним агентством дослідження раку (IARC) як канцерогенні (група 1) при хронічній дії. Нікель в організмі може спричинити нейротоксичні ефекти, серцево-судинні та ниркові захворювання. Саме токсичність і канцерогенність нікелю пов'язані із мітохондріальними дисфункціями та окислювальним стресом [6]. При надлишкових концентраціях інгібує ріст та перешкоджає роботі ферментів RISCs (сульфітоксидаза та сульфурдіоксигеназа) [7]. Крім того нікель може викликати певні епігенетичні зміни: гіперметиловання ДНК та модифікацію гістонів, що порушують геном та потенційно можуть спричинити розвиток пухлин [6].

Перевищені концентрації цинку (Zn) можуть мати нейротоксичну дію: синаптично вивільнений цинк спричиняє загибель нейронів, що перешкоджає виробленню клітинної енергії через порушення роботи мітохондрій. Високий рівень цинку може викликати неврологічні симптоми: млявість, запаморочення, тривожність та навіть депресію. За хронічної дії підвищені концентрації цинку в організмі людини можуть спричинити дефіцит міді та конкурентну взаємодію із залізом, внаслідок чого може знизитись сироватковий феритин та гематокрит [8].

Токсична дія мангану (Mn) в надмірних концентраціях в основному спрямована на мозок, що спричиняє марганізм – хворобу, що за загальними ознаками нагадує хворобу Паркінсона: порушення мовлення, специфічну ходу, атаксія, порушення дрібної моторики, дофамінергічна дисфункція. Небезпека полягає у незворотності нейротоксичних ефектів спричинених дією мангану. Також перевищення мангану в організмі може спричинити зміни у роботі серцево-судинної функції, особливо після гострого впливу [9].

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** Для оцінки якості проб ґрунту, який було відібрано у кратері до вибуху ВНП та після його контрольованої детонації, було проведено хімічний аналіз на вміст важких металів та нафтопродуктів. Результати наведені у таблиці 1.

З результатів аналізу бачимо значне перевищення гранично-допустимих концентрацій важких металів у ґрунті, а саме свинцю, нікелю, кадмію, хрому та цинку. На основі досліджуваних зразків проведено біотестування сформованого середовища для визначення рівня його гострої токсичності та потенційного впливу на живі організми.

Методика проведення дослідження гострої токсичності залишків бризантних речовин та нафтопродуктів в землі після детонації вибухо-небезпечного предмета на ембріонах риб *Danio rerio*.

Таблиця 1

## Результати хімічних досліджень проб ґрунтів, уражених військовими діями

Вміст важких металів (валовий вміст), мг/кг	Проба № 1 (до детонації ВВП)	Проба № 2 (після детонації ВВП)	ГДК у ґрунті за Гігієнічними регламентами*, мг/кг	Перевищення у пробі № 2 відносно ГДК в п разів
1	2	3	4	5
<b>Pb</b>	84,5	357,0	32,0	11,16
<b>Cu</b>	1,56	1,91	3,0	-
<b>Ni</b>	228,6	229,6	4,0	57,4
<b>Cd</b>	0,14	4,58	1,5	3
<b>Cr</b>	10,6	36,6	0,05	732
<b>Zn</b>	189,1	331,6	23,0	14,4
<b>Mn</b>	129,8	255,4	1500,0	-
<b>Нафтопродукти, мг/кг</b>	80,0	342,0	1000,0	-

Гігієнічні регламенти допустимого вмісту хімічних речовин у ґрунті, затверджені Наказом Міністерства охорони здоров'я України від 14 липня 2020 року № 1595

Дослідження гострої токсичності зразків проводили на ембріонах риб *Danio rerio* (зебрафіш) відповідно до міжнародної методики OECD Guideline 236 "Fish Embryo Acute Toxicity (FET) Test" (OECD, 2013) [10]. Методика була адаптована та валідувана для умов лабораторії кафедри трансляційної медичної біоінженерії факультету біомедичної інженерії, що підтверджено звітом про валідацію № 01/2025 від 09.09.2025.

За результатами валідації встановлено, що метод забезпечує відтворюваність показників життєздатності ембріонів згідно з критеріями OECD 236. Під час перевірки використовували референтну сполуку 3,4-дихлоранілін (3,4-DCA), для якої отримане значення  $LC_{50}$  (96 год) = 2,4 мг/л, що відповідає рекомендованому діапазону чутливості (2,0–4,0 мг/л).

Ембріони *Danio rerio* одержували шляхом природного нересту здорових статевозрілих риб. Відібрані запліднені яйця (не пізніше ніж 2 год після запліднення, hpf) промивали у дистильованій воді та розміщували по 1 ембріону у 20 комірок 24-коміркового мікропланшета. Об'єм експозиційного середовища становив 2 мл на одну комірку.

Яктестові зразки використовували водні екстракти ґрунту до та після детонації. Для одержання екстрактів зразки ґрунту по 300 г змішували з 750 мл дистильованої води у співвідношенні 1:4 та витримували 24 год при  $25 \pm 2$  °C в орбітальному шейкері-інкубаторі BIOSAN ES-20/60 з перемішуванням 50 об/хв, після чого фільтрували через паперовий фільтр. Отримані екстракти розводили до необхідних концентрацій. Використовували розведення 1:1 з водою та 1:3 з водою. Негативним контролем служила чиста дистильована вода. Позитивний контроль із фіксованою концентрацією 4 мг/л 3,4-дихлораніліну також використовувався для порівняння.

Ембріони експонували у тестових середовищах протягом 96 год при температурі  $26 \pm 1$  °C та світ-

ловому режимі 14:10 (світло:темрява). Середовище замінювали або доповнювали щодня. Спостереження проводили через 24, 48, 72 та 96 год після початку експозиції.

Критеріями життєздатності ембріонів відповідно до OECD 236 були:

- коагуляція (згортання) ембріону;
- відсутність серцебиття;
- відсутність відокремлення хвостового відділу;
- відсутність формування сомітів.

Визначали частку нежиттєздатних ембріонів у кожній групі. Статистичну обробку результатів здійснювали із використанням програмного забезпечення Microsoft Excel та середовища R.

**Новизна.** Отримані результати дозволили оцінити рівень гострої токсичності тестових зразків щодо ембріонів *Danio rerio* та використовувати методику для подальшого моніторингу впливу вибухових залишків, бризантних речовин і нафтопродуктів у водному середовищі.

**Виклад основного матеріалу.** Щоб результати експерименту вважалися дійсними, виконувалися кілька стандартних критеріїв. Загальний відсоток запліднення яєць у кожній партії мав становити не менше 70%. Вживаність ембріонів у негативному контролі та, при потребі, у контрольній групі з розчинником мала бути  $\geq 90\%$  до кінця 96-годинної експозиції. Водночас експозиція до позитивного контролю повинна була викликати мінімальну смертність 30%, що дозволяє оцінити чутливість тесту. Відсоток вилуплення ембріонів у негативному контролі, а також у контрольній групі з розчинником, якщо застосовувався, мав становити  $\geq 80\%$ . Крім того, наприкінці 96 годин концентрація розчиненого кисню у негативному контролі та у найвищій тестованій концентрації повинна була залишатися на рівні  $\geq 80\%$  від насичення.

Таким чином, дотримання цих критеріїв забезпечувало валідність тесту та дозволяло достовірно оці-

нити вплив різних концентрацій екстрактів ґрунту на розвиток і морфологічні ознаки ембріонів *Danio rerio*.

**Результати.** Результати експерименту показали, що виживаність ембріонів *Danio rerio* залежить від концентрації екстрактів ґрунту та часу експозиції. У групі з екстрактом ґрунту після вибуху (Soil\_after) при найнижчій концентрації 0,25 смертність ембріонів була відсутня протягом перших 72 годин і становила 20% на 96-й годині, а до 120-ї години всі ембріони загинули. При концентрації 0,5 загибель ембріонів розпочиналася вже на 24-й годині (20%) і поступово зростала до 60% на 120-й годині. Нативний екстракт (1) викликав помірну смертність, яка становила 50–55% до кінця експозиції.

У групі ґрунту до вибуху (Soil\_before) спостерігалася схожа доза- та часозалежна динаміка, проте загальна смертність при тих же концентраціях була дещо нижчою. Так, для концентрації 0,25 смертність на 96-й годині досягала 65%, а на 120-й – 100%. Для концентрації 0,5 загибель коливалася від 20% на 24-й годині до 60% на 120-й. Нативний екстракт (1) викликав смертність 25–35% протягом експозиції.

Негативний контроль (вода) демонстрував високу виживаність ембріонів: 90% залишалися живими до кінця 120-годинного спостереження. Позитивний контроль (3,4-дихлоранілін, 4 мг/л) підтвердив чутливість системи: смертність ембріонів зростала від 45% на 24-й годині до 65% на 96-й та 120-й годині.

У ході дослідження також оцінювали вплив водних екстрактів ґрунту на розвиток ембріонів *Danio rerio*, зокрема звертали увагу на серцебиття (HeartRate),

набряки (Edema) та інші морфологічні ознаки (Other\_sign). Експеримент включав такі групи: Негативний контроль (0) – вода для розведення; Нативний екстракт ґрунту (1); Розведення 1:1 (0,5) – 1 мл нативного екстракту + 1 мл води; Розведення 1:3 (0,25) – 250 мкл нативного екстракту + 1 мл води; Позитивний контроль (4) – 3,4-дихлоранілін 4,0 мг/л.

Результати свідчать про чітку доза-залежну токсичність. Серцебиття (HeartRate): у негативному контролі та при низьких дозах екстракту (0,25–0,5) серцебиття залишалось нормальним. Нативний екстракт (1) спричинив поодинокі випадки слабого серцебиття (1 із 20 ембріонів). Позитивний контроль (4) викликав значні порушення серцебиття у більшості ембріонів (8 із 20). Набряки (Edema): негативний контроль та низькі розведення (0,25–0,5) не спричинили появи набряків. Нативний екстракт (1) викликав поодинокі прояви едеми жовточного мішка (5 ембріонів). Позитивний контроль (4) призвів до різних видів набряків, включно з перикардом, жовточним мішком та хвостом, іноді комбінованих у кількох ембріонів. Інші морфологічні ознаки (Other\_sign): при низьких дозах (0,25–0,5) спостерігалися поодинокі ушкодження (деформоване око). Нативний екстракт (1) викликав окремі морфологічні зміни: пошкоджене око, порушення рухів хвостом, пошкодження оболонки яйця. Позитивний контроль (4) спричинив широкий спектр уражень, включно з ушкодженням плавників, щелепи, нерухомістю хвоста, порушенням пігментації очей та комбінованими морфологічними змінами.

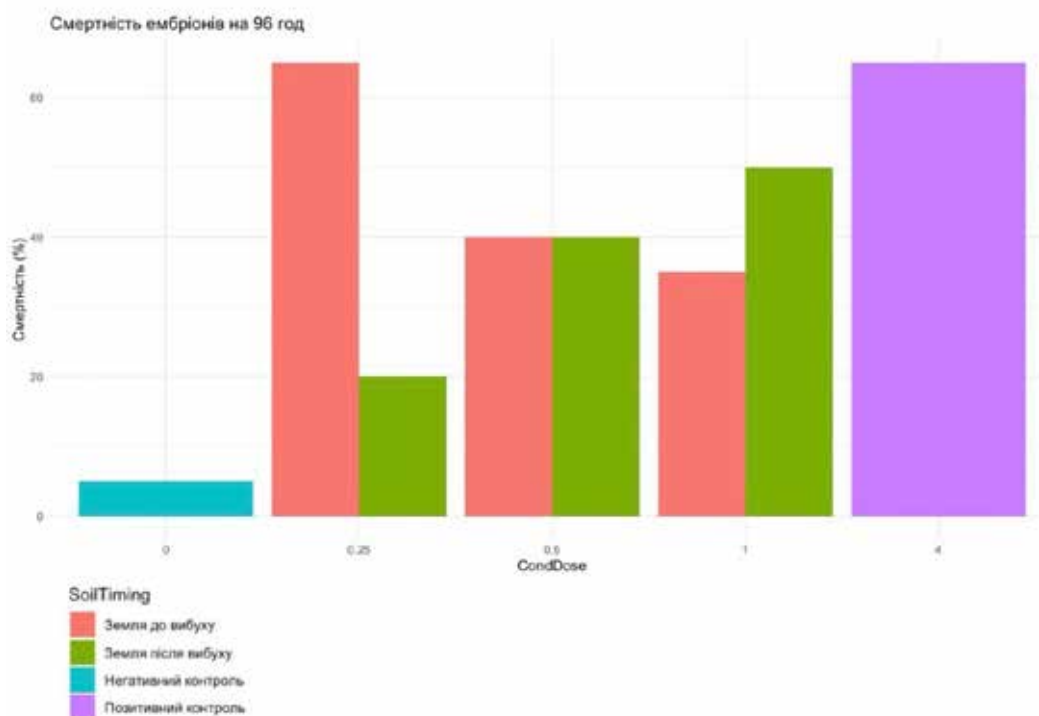


Рис. 1. Порівняльні показники смертності ембріонів *Danio rerio*

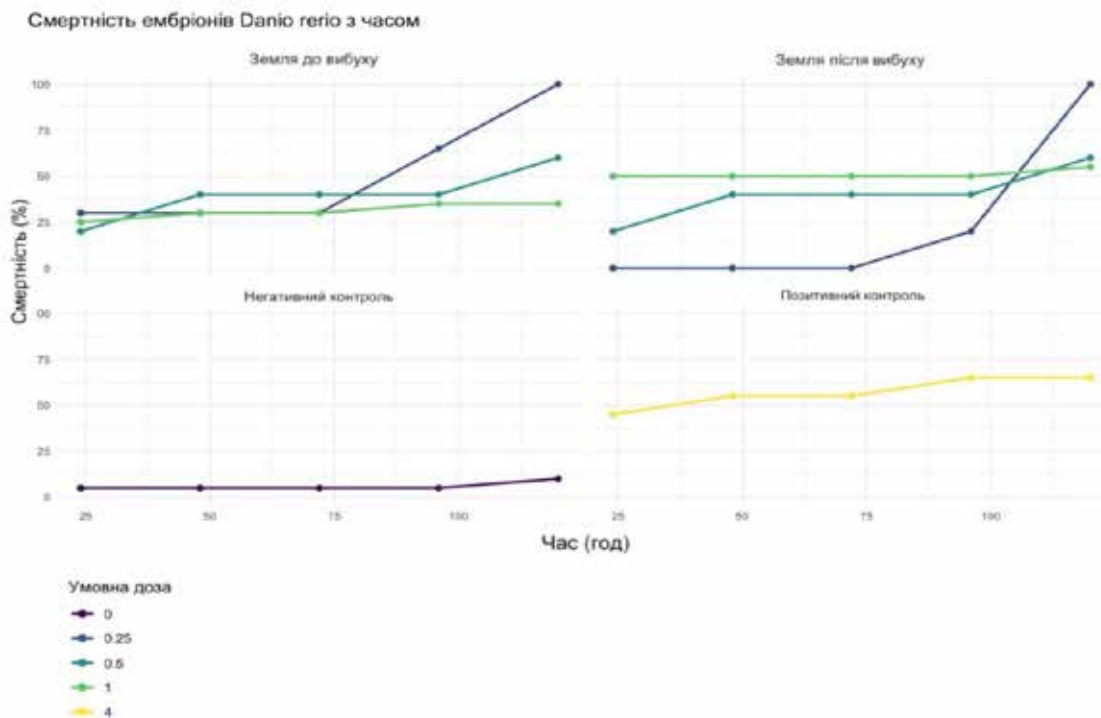


Рис. 2. Смертність ембріонів *Danio rerio* з часом

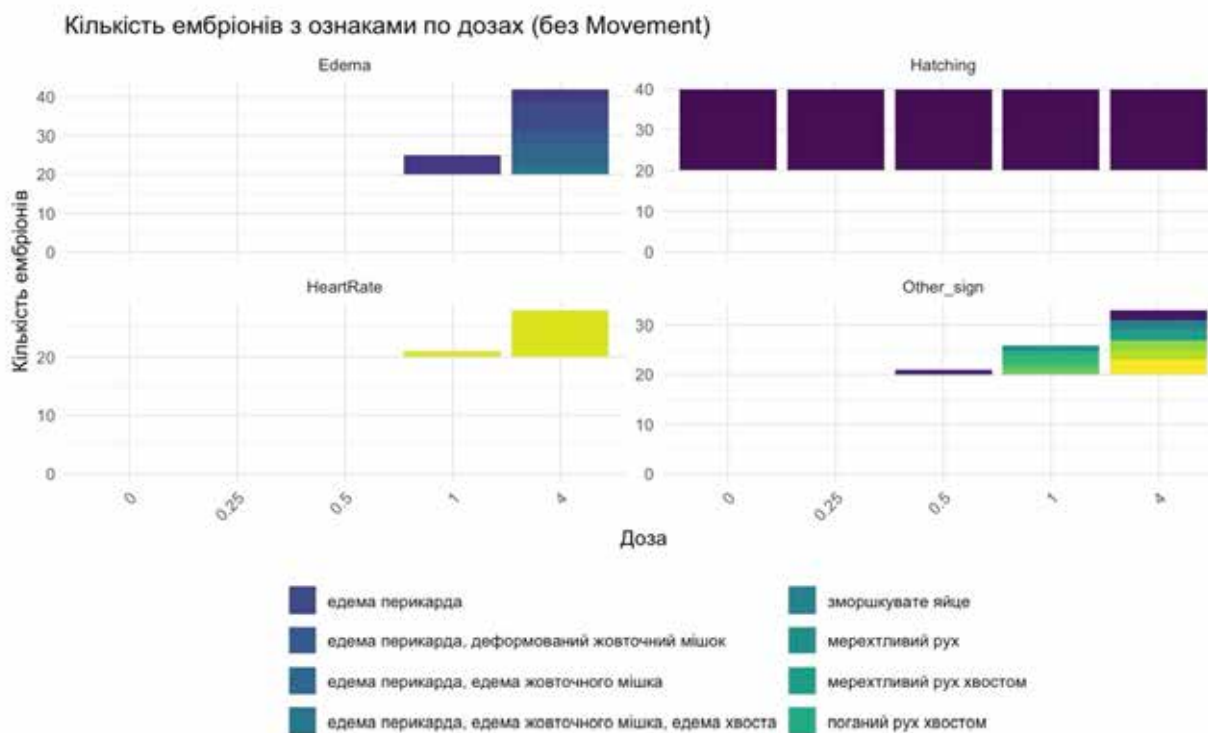


Рис. 3. Кількість ембріонів з ознаками розраду розвитку

Таким чином, експеримент показав, що низькі розведення екстракту ґрунту практично не впливають на розвиток ембріонів, нативний екстракт

викликає помірні ефекти, а позитивний контроль підтвердив чутливість тест-системи та продемонстрував виражену токсичність. Дані свідчать про

доза-залежний ефект для всіх досліджуваних ознак та дозволяють робити висновки щодо потенційної токсичності ґрунтових екстрактів.

**Головні висновки.** Аналіз результатів дослідження показав, що вплив нативних екстрактів ґрунту та їх розведень на ембріони *Danio rerio* залежав від концентрації та часу експозиції. Ембріони, які перебували у негативному контролі (вода), зберігали високу життєздатність протягом всіх 120 годин спостереження, що підтверджує валідність проведеного тесту. У позитивному контролі (3,4-дихлоранілін, 4 мг/л) спостерігалася суттєва смертність та прояв різних токсичних ознак, зокрема слабке серцебиття, едема перикарда та жовточного мішка, порушення рухової активності та деформації, що підтверджує чутливість системи до відомого токсиканту.

Для ґрунту до вибуху та після вибуху прояв токсичних ефектів також був дозозалежним. Вищі концентрації нативного екстракту та менші розведення викликали збільшення смертності ембріонів та появу морфологічних змін, таких як едема жовточного мішка, перикарда, деформації ока та порушення рухової активності. Найбільш чутливими ознаками токсичності виявилися зміни серцебиття, едема та морфологічні дефекти.

**Перспективи використання результатів дослідження.** Таким чином, результати демонструють, що залишки вибухових речовин та компонентів ракетного палива в ґрунті можуть негативно впливати на розвиток ембріонів риб, причому ефект посилюється зі збільшенням концентрації екстракту. Це підкреслює необхідність подальшого дослідження потенційної токсичності таких середовищ та оцінки ризику для водних організмів.

### Література

1. Полі Е., Седдон Б. Вибухові боєприпаси: посібник для України: [2-ге вид.] / за підтримки Чарапіч Й. ; Geneva International Centre for Humanitarian Demining (GICHD). Женева: GICHD, 2022. С. 9–23.
2. Wani A. L., Ara A., Usmani J. A. Lead toxicity: a review. *Interdisciplinary Toxicology*. 2015. Vol. 8, № 2. P. 55–64. DOI: 10.1515/intox-2015-0009.
3. Cruz F. J. R., Oliveira Neto C. F., Ferreira R. L. C., Galvão J. R. Copper Toxicity in Plants: Nutritional, Physiological, and Biochemical Aspects. *ResearchGate*. 2022.
4. Rahimzadeh M. R., Rahimzadeh M., Kazemi S., Moghadamnia A. Cadmium toxicity and treatment: An update. *Caspian Journal of Internal Medicine*. 2017. Vol. 8, № 3. P. 135–145. DOI: 10.22088/cjim.8.3.135.
5. Shekhawat K., Chatterjee S., Joshi B. Chromium Toxicity and its Health Hazards. *International Journal of Advanced Research*. 2022.
6. Genchi G., Carocci A., Lauria G., Sinicropi M. S., Catalano A. Nickel: Human Health and Environmental Toxicology. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020. Vol. 17. Art. 679. DOI: 10.3390/ijerph17030679.
7. Das S., Dash H. R., Chakraborty J. Genetic basis and importance of metal resistant genes in bacteria for bioremediation of contaminated environments with toxic metal pollutants. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2016. Vol. 100. P. 2967–2984. DOI: 10.1007/s00253-016-7364-4.
8. Nriagu J. Zinc Toxicity in Humans / School of Public Health, University of Michigan. Amsterdam: Elsevier B.V., 2007.
9. O'Neal S. L., Zheng W. Manganese Toxicity Upon Overexposure: a Decade in Review. *Current Environmental Health Reports*. 2015. Vol. 2, № 4. P. 315–328.
10. OECD. Guidelines for the Testing of Chemicals. Test No. 236: Fish Embryo Acute Toxicity (FET) Test. Paris: OECD Publishing, 2013.

Дата першого надходження статті до видання: 14.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026

## ЕКОЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА СТАНУ ҐРУНТІВ МІСТА УМАНЬ ПІД ВПЛИВОМ ТЕХНОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Парахненко В.Г.<sup>1</sup>, Гончарук В.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Уманський національний університет  
вул. Інститутська 1, 20300, м. Умань

<sup>2</sup>Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини  
вул. Садова, 2, 20300, м. Умань

[vladparachnenko@ukr.net](mailto:vladparachnenko@ukr.net), [gvtalii1975@gmail.com](mailto:gvtalii1975@gmail.com)

Здійснено комплексну екологічну характеристику стану ґрунтів міста Умань в умовах зростаючого техногенного навантаження на навколишнє середовище. Актуальність дослідження зумовлена інтенсифікацією урбанізаційних процесів, розвитком транспортної інфраструктури, діяльністю промислових і комунальних об'єктів, а також накопиченням забруднювальних речовин у ґрунтовому покриві, що становить потенційну загрозу для екологічної безпеки міських екосистем і здоров'я населення. Ґрунти розглянуто як ключовий компонент урбанізованого ландшафту, здатний акумулювати техногенні домішки та відображати довготривалий вплив антропогенних факторів.

У роботі проаналізовано просторові особливості забруднення ґрунтів міста важкими металами, нафтопродуктами та іншими токсичними сполуками, визначено основні джерела їх надходження та рівень екологічної небезпеки. Оцінювання стану ґрунтів здійснено з урахуванням принципів загальної та ландшафтної екології, зокрема функціонування ґрунтів як елементів міських екосистем, їх буферної здатності, стійкості до антропогенного впливу та потенціалу до самовідновлення. Виявлено території з підвищеним рівнем техногенного навантаження, де спостерігаються ознаки деградації ґрунтового покриву та зниження його екологічних функцій.

Особливу увагу приділено застосуванню геоінформаційних систем і методів екологічного моніторингу для картографування рівнів забруднення ґрунтів, аналізу їх просторової диференціації та прогнозування подальших змін. Обґрунтовано доцільність використання ґрунтових індикаторів як інструменту оцінювання екологічної безпеки урбанізованих територій і прийняття управлінських рішень у сфері охорони довкілля. Запропоновано напрями зниження техногенного впливу на ґрунти міста Умань, зокрема шляхом удосконалення системи екологічного контролю, рекультивативі порушених територій та інтеграції ґрунтового моніторингу в загальну систему управління міським середовищем.

Результати дослідження мають практичне значення для органів місцевого самоврядування, екологічних служб і фахівців у галузі охорони довкілля та можуть бути використані для розроблення заходів з підвищення рівня екологічної безпеки та сталого розвитку урбанізованих територій. *Ключові слова:* ґрунти міста, техногенне забруднення, екологічна безпека, урбанізовані території, важкі метали, ґрунтовий покрив, ландшафтна екологія, моніторинг довкілля, геоінформаційні системи, деградація ґрунтів.

### Ecological characteristics of the state of soils in the city of uman under the influence of technogenic pollution of the environment. Parakhnenko V., Goncharuk V.

A comprehensive environmental assessment of the state of soils in the city of Uman was carried out in the context of growing anthropogenic pressure on the environment. The relevance of the study is due to the intensification of urbanization processes, the development of transport infrastructure, the activities of industrial and municipal facilities, as well as the accumulation of pollutants in the soil cover, which poses a potential threat to the ecological safety of urban ecosystems and public health. Soils are considered as a key component of the urbanized landscape, capable of accumulating anthropogenic impurities and reflecting the long-term impact of anthropogenic factors.

The paper analyzes the spatial characteristics of soil pollution in the city with heavy metals, petroleum products, and other toxic compounds, identifies the main sources of their origin and the level of environmental hazard. The assessment of soil condition was carried out taking into account the principles of general and landscape ecology, in particular the functioning of soils as elements of urban ecosystems, their buffering capacity, resistance to anthropogenic impact, and potential for self-recovery. Areas with increased levels of technogenic load were identified, where signs of soil cover degradation and a decrease in its ecological functions were observed.

Particular attention is paid to the use of geographic information systems and environmental monitoring methods for mapping soil pollution levels, analyzing their spatial differentiation, and predicting future changes. The feasibility of using soil indicators as a tool for assessing the environmental safety of urban areas and making management decisions in the field of environmental protection is justified. Directions for reducing the anthropogenic impact on the soils of the city of Uman are proposed, in particular by improving the environmental control system, recultivating disturbed areas, and integrating soil monitoring into the overall urban environment management system.

The results of the study are of practical importance for local authorities, environmental services, and specialists in the field of environmental protection and can be used to develop measures to improve the level of environmental safety and sustainable development of urban areas. *Key words:* city soils, technogenic pollution, environmental safety, urbanized areas, heavy metals, soil cover, landscape ecology, environmental monitoring, geographic information systems, soil degradation.



**Постановка проблеми.** У сучасних умовах зростаючого антропогенного навантаження на урбанізовані території питання екологічної безпеки ґрунтового покриву набуває особливої актуальності, оскільки ґрунти є одним із найбільш уразливих і водночас інформативних компонентів міського довкілля. Урбанізація, розвиток промислових і комунальних об'єктів, інтенсивний транспортний рух, ущільнення забудови та порушення природної структури ландшафтів зумовлюють накопичення у ґрунтах міста Умань техногенних забруднювачів, зокрема важких металів, нафтопродуктів і токсичних сполук, що негативно впливають на екологічний стан території та здоров'я населення.

За умов тривалого техногенного впливу ґрунти міських територій втрачають здатність виконувати свої основні екологічні функції – регуляцію кругообігу речовин, фільтрацію забруднювачів, підтримання біорізноманіття та стабільності екосистем. Особливо небезпечними є локальні осередки забруднення, пов'язані з промисловими зонами, транспортними магістралями, місцями накопичення відходів та об'єктами інженерної інфраструктури, де відбувається формування зон підвищеного екологічного ризику. За відсутності системного контролю та комплексної оцінки стану ґрунтів такі процеси можуть мати кумулятивний і довготривалий характер, спричиняючи деградацію міських ландшафтів.

Незважаючи на наявність нормативних вимог щодо охорони ґрунтів, у практиці екологічного контролю часто спостерігається фрагментарність досліджень, обмеженість моніторингових даних та недостатній облік просторової диференціації техногенного навантаження. Це ускладнює своєчасне виявлення небезпечних тенденцій, оцінку реального рівня забруднення ґрунтів і прогнозування подальших змін їх екологічного стану. За таких умов зростає потреба у проведенні комплексної екологічної характеристики ґрунтів міста Умань з урахуванням принципів загальної та ландшафтної екології, що дає змогу розглядати ґрунтовий покрив як складову цілісної міської екосистеми.

**Актуальність дослідження.** Зростання масштабів антропогенного впливу на урбанізовані території формує нові виклики у сфері охорони ґрунтів і забезпечення екологічної безпеки міського середовища. Інтенсифікація урбанізаційних процесів, розвиток промислових і комунальних об'єктів, збільшення транспортного навантаження та ущільнення забудови зумовлюють істотну трансформацію ґрунтового покриву міста Умань. У результаті відбувається накопичення техногенних забруднювачів, порушення природної структури та функцій ґрунтів, зниження їх екологічної стійкості й здатності до саморегуляції, що створює потенційні загрози для здоров'я населення та сталого розвитку міської території.

Особливої актуальності набуває проблема адекватної оцінки стану ґрунтів у межах урбанізова-

них ландшафтів, оскільки традиційні підходи до контролю ґрунтового забруднення часто мають фрагментарний характер, базуються на обмеженій кількості показників і не враховують просторову неоднорідність техногенного навантаження. Відсутність системного моніторингу та комплексного аналізу ускладнює виявлення зон підвищеного екологічного ризику, оцінку кумулятивного впливу забруднювальних речовин і прогнозування подальших змін екологічного стану ґрунтового покриву міста.

Важливим аспектом актуальності дослідження є необхідність інтеграції положень загальної та ландшафтної екології у процес оцінювання ґрунтів міських територій. Ґрунти слід розглядати не лише як депо техногенних домішок, а як функціональний елемент міської екосистеми, що бере участь у кругообігу речовин і енергії, формуванні біотичних зв'язків та підтриманні екологічної рівноваги. Недостатній облік цих закономірностей призводить до спрощеного розуміння екологічних загроз і зниження ефективності природоохоронних заходів.

У сучасних умовах особливої значущості набуває застосування комплексних підходів до дослідження ґрунтового покриву міста Умань, які поєднують інструментальні методи аналізу, екологічні індикатори, геоінформаційні технології та просторове моделювання. Реалізація таких підходів дає змогу об'єктивно оцінити рівень техногенного забруднення ґрунтів, визначити екологічно небезпечні ділянки та обґрунтувати напрями зниження екологічних ризиків. Саме тому дослідження екологічного стану ґрунтів міста Умань під впливом техногенного забруднення є актуальним і необхідним для формування науково обґрунтованих рішень у сфері охорони довкілля та забезпечення екологічної безпеки урбанізованих територій.

**Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.** Авторський доробок спрямований на розв'язання комплексу актуальних наукових і прикладних завдань, пов'язаних з оцінюванням екологічного стану ґрунтів урбанізованих територій та зниженням негативного впливу техногенного забруднення на міське довкілля. В умовах інтенсивного розвитку міста Умань, зростання транспортного навантаження, функціонування промислових і комунальних об'єктів особливого значення набуває науково обґрунтована оцінка ґрунтового покриву як базового компонента міських ландшафтів і ключового індикатора екологічної безпеки території. Результати дослідження сприяють формуванню цілісного уявлення про просторові закономірності техногенного впливу та механізми трансформації ґрунтів у межах урбанізованого середовища.

Наукове значення роботи полягає у поглибленні теоретико-методологічних засад екологічної оцінки ґрунтів міських територій на основі положень

загальної та ландшафтної екології. У дослідженні ґрунти розглянуто як елемент складної міської екосистеми, що взаємодіє з іншими компонентами довкілля та реагує на антропогенне навантаження шляхом накопичення забруднювальних речовин і зміни своїх екологічних функцій. Запропоновані підходи до аналізу рівнів техногенного забруднення, екологічної стійкості та просторової диференціації ґрунтового покриву розширюють наукові уявлення про процеси деградації ґрунтів у межах урбанізованих ландшафтів і можуть бути використані в подальших наукових дослідженнях [3].

Практична цінність авторського доробку полягає у можливості застосування отриманих результатів для вирішення завдань екологічного моніторингу, територіального планування та управління міським середовищем. Розроблені підходи до оцінювання стану ґрунтів і виявлення зон підвищеного екологічного ризику можуть бути використані органами місцевого самоврядування, екологічними службами та природоохоронними установами під час планування природоохоронних заходів, рекультивації порушених земель і оптимізації землекористування. Таким чином, результати дослідження мають важливе значення як для розвитку наукових основ екології ґрунтів та ландшафтної екології, так і для практичного забезпечення екологічної безпеки міста Умань в умовах техногенного навантаження.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Упродовж останніх десятиліть у наукових дослідженнях істотно зросла увага до проблем екологічного стану ґрунтів урбанізованих територій, зокрема під впливом техногенного забруднення. Ґрунтовий покрив розглядається як один із найбільш інформативних індикаторів антропогенного навантаження, здатний акумулювати забруднювальні речовини та відображати довготривалі наслідки господарської діяльності. Теоретичні та методологічні засади оцінювання стану ґрунтів і ландшафтів сформовано у працях українських учених-географів та екологів, зокрема М. Д. Гродзинського, П. Г. Шищенка, Л. Д. Руденка, у яких обґрунтовано необхідність комплексного ландшафтно-екологічного підходу до аналізу деградаційних процесів у межах природних і міських територій.

Значний внесок у дослідження екологічного стану ґрунтів зробили праці, присвячені урбанізованим ландшафтам і трансформації ґрунтового покриву під впливом антропогенних факторів (В. П. Кучерявий, О. Г. Голубцов, М. А. Хильчевський). У цих роботах розглянуто закономірності зміни фізико-хімічних властивостей ґрунтів, їх забруднення важкими металами, нафтопродуктами та іншими токсикантами, а також роль ґрунтів у забезпеченні екологічної стійкості міських екосистем. Автори підкреслюють, що техногенно змінені ґрунти втрачають свої природні регуляторні функції, що призводить до підвищення екологічних ризиків у межах міст.

Окремий напрям сучасних досліджень пов'язаний з оцінюванням просторової диференціації забруднення ґрунтів і використанням геоінформаційних систем у ґрунтово-екологічному аналізі (О. В. Ковальчук, Н. Ф. Качинська, О. В. Землянська). У цих публікаціях обґрунтовано доцільність поєднання результатів лабораторних аналізів із ГІС-технологіями для картографування рівнів забруднення, виявлення зон підвищеного техногенного навантаження та прогнозування екологічного стану міських територій. Такий підхід дозволяє більш повно враховувати просторову неоднорідність ґрунтового покриву та специфіку урбанізованих ландшафтів.

Водночас у низці наукових робіт наголошується на недостатності фрагментарних досліджень ґрунтів і необхідності переходу до комплексної екологічної характеристики, яка поєднує положення загальної, ландшафтної та ґрунтової екології (М. М. Назаренко, О. Г. Тараріко). Автори підкреслюють, що лише системний аналіз дозволяє оцінити реальний рівень техногенного навантаження, кумулятивний ефект забруднення та екологічну небезпеку для міських екосистем і населення.

Отже, аналіз наукових публікацій свідчить про значний розвиток теоретичних і прикладних досліджень у сфері екології ґрунтів та урбанізованих ландшафтів. Водночас недостатньо опрацьованими залишаються питання комплексної оцінки стану ґрунтів окремих міст з урахуванням локальних джерел техногенного забруднення та просторових особливостей урбанізованого середовища. Саме це зумовлює актуальність дослідження екологічного стану ґрунтів міста Умань як складової забезпечення екологічної безпеки території [4].

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** Попри наявність значного наукового доробку у сфері екології ґрунтів, урбаністичної екології та ландшафтно-екологічних досліджень, низка важливих аспектів оцінювання стану ґрунтового покриву міст під впливом техногенного забруднення залишається недостатньо опрацьованою. Передусім це стосується комплексної екологічної характеристики ґрунтів урбанізованих територій, яка б поєднувала аналіз хімічного забруднення, просторову диференціацію техногенного навантаження та оцінку екологічних функцій ґрунтів у межах міських екосистем. У більшості існуючих досліджень переважає фрагментарний підхід, орієнтований на окремі показники або локальні ділянки, що не дозволяє сформулювати цілісне уявлення про рівень екологічної небезпеки ґрунтів міста в цілому.

Недостатньо вивченими залишаються питання просторової неоднорідності забруднення ґрунтів у межах міських ландшафтів та взаємозв'язку між джерелами техногенного впливу, функціональним зонуванням міста й екологічним станом ґрунтового

покриву. Існуючі методики оцінювання часто не враховують специфіку урбанізованих ґрунтів, їх змінену морфологію, буферні властивості та здатність до акумуляції забруднювальних речовин у довготривалій перспективі. Це ускладнює визначення зон підвищеного екологічного ризику та прогнозування подальших деградаційних процесів.

Крім того, недостатньо реалізованим залишається потенціал інтеграції принципів загальної та ландшафтної екології у практику дослідження міських ґрунтів. У багатьох роботах ґрунтовий покрив розглядається ізольовано від інших компонентів міського середовища, без урахування екосистемних зв'язків, процесів саморегуляції та ролі ґрунтів у підтриманні екологічної стійкості урбанізованих територій. Також обмежено використовується інструментарій геоінформаційних систем, просторового моделювання та екологічних індикаторів для комплексної оцінки техногенного забруднення ґрунтів і його екологічних наслідків [5].

Саме ці невирішені аспекти зумовлюють необхідність проведення комплексного дослідження екологічного стану ґрунтів міста Умань під впливом техногенного забруднення, спрямованого на поєднання аналітичних, просторових і екосистемних підходів та формування науково обґрунтованих рекомендацій щодо підвищення екологічної безпеки урбанізованої території.

**Новизна:** полягає у комплексній екологічній оцінці стану ґрунтів міста Умань під впливом техногенного забруднення з урахуванням принципів загальної та ландшафтної екології. Вперше для умов міста Умань ґрунтовий покрив розглянуто не лише як об'єкт накопичення забруднювальних речовин, а як функціональний компонент урбанізованої екосистеми, що виконує регуляторні, буферні та індикаторні функції в умовах інтенсивного антропогенного навантаження.

Запропоновано інтегрований підхід до оцінювання екологічного стану міських ґрунтів, який поєднує аналіз рівнів техногенного забруднення, просторову диференціацію ґрунтового покриву та оцінку екологічної вразливості різних функціональних зон міста. На відміну від традиційних досліджень, орієнтованих на окремі показники або локальні ділянки, у роботі враховано структурно-функціональні особливості урбанізованих ландшафтів, інтенсивність техногенного впливу та здатність ґрунтів до акумуляції й нейтралізації забруднювачів.

Уперше обґрунтовано можливість використання ґрунтів міста Умань як інтегрального індикатора екологічної безпеки урбанізованої території та інструменту прийняття управлінських рішень у сфері охорони довкілля. Отримані результати дозволяють підвищити наукову обґрунтованість оцінки екологічних ризиків, визначити пріоритетні зони для природоохоронних заходів і створюють основу для формування ефективної системи моніторингу та

управління станом ґрунтового покриву в умовах техногенного навантаження.

**Методологічне або загальнонаукове значення** полягає у формуванні цілісного підходу до оцінювання стану ґрунтів міських територій під впливом техногенного забруднення, який поєднує принципи загальної та ландшафтної екології, положення екологічної безпеки та сучасні інструменти моніторингу урбанізованих екосистем. Запропонована методологічна схема передбачає інтеграцію результатів хімічного та фізико-хімічного аналізу ґрунтів, просторового моделювання забруднення за допомогою геоінформаційних систем, оцінки екологічної вразливості функціональних зон міста та ризик-орієнтованого аналізу впливу техногенних факторів. Такий підхід дозволяє комплексно оцінювати стан ґрунтів, виявляти локальні осередки забруднення та прогнозувати можливі наслідки для екологічної безпеки міської території.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження зосереджене на комплексній оцінці стану ґрунтів міста Умань під впливом техногенного забруднення та визначенні його наслідків для екологічної безпеки урбанізованих територій. Аналіз включає оцінювання фізико-хімічних властивостей ґрунтів, концентрацій важких металів, нафтопродуктів та інших забруднювальних речовин, а також просторову диференціацію забруднення за функціональними зонами міста: промисловою, житловою, транспортною та рекреаційною.

Для оцінки використовувалися дані ґрунтового моніторингу, проведеного у межах міських ландшафтів, а також результати лабораторного аналізу проб ґрунтів з різних ділянок міста. Просторовий аналіз здійснено за допомогою геоінформаційних систем, що дозволило виявити локальні осередки підвищеного техногенного навантаження, оцінити екологічну вразливість територій та визначити потенційні ризики для функціонування міських екосистем.

Такий підхід дає змогу не лише фіксувати фактичний рівень забруднення ґрунтів, а й прогнозувати динаміку їх деградації, оцінювати вплив техногенних факторів на екологічну стійкість міських ландшафтів та обґрунтовувати пріоритети природоохоронних заходів. Отримані результати можуть бути використані для розробки рекомендацій щодо рекультивациі порушених земель, планування територій та підвищення ефективності системи управління екологічною безпекою міста Умань [7].

Демонструє основні фізико-хімічні параметри ґрунтів у різних функціональних зонах міста Умань. Значення рН коливаються в межах 7,0–7,4, що свідчить про слабколужну реакцію ґрунтів. Найвищий рівень рН спостерігається в рекреаційній зоні (7,4), а найнижчий – поруч із АЗС (7,0), що може бути пов'язано з локальним техногенним впливом. Вологість ґрунтів найвища в рекреаційній зоні

Таблиця 1

## Фізико-хімічні показники ґрунтів

Показник	Житлова зона	Поблизу дороги	Поруч АЗС	Рекреаційна зона
pH	7.3	7.1	7.0	7.4
Вологість, %	18	14	15	20
Органічна речовина, %	3.8	3.5	3.2	4.1
Температура (°C)	12	12	12	11

Таблиця 2

## Концентрації важких металів у ґрунтах (мг/кг)

Метал	Житлова зона	Поблизу дороги	Поруч АЗС	Рекреаційна зона	ГДК (мг/кг)
Pb	3.2	9.0	8.6	2.1	2.0
Ni	2.5	5.2	4.8	1.9	2.0
Cu	1.8	2.3	2.1	1.5	5.0
Zn	4.1	5.6	5.3	3.9	10

(20%) і найнижча поблизу дороги (14%), що відображає вплив інтенсивного транспорту та ущільнення ґрунту. Вміст органічної речовини коливається від 3,2% до 4,1%, при цьому рекреаційна зона характеризується найвищим показником, що свідчить про більш здорову структуру ґрунту та кращі умови для біологічної активності. Температурні показники практично однакові у всіх зонах (11–12 °C), що відповідає середньомісячним значенням для досліджуваного періоду. В цілому таблиця відображає закономірності впливу антропогенних факторів на фізико-хімічні властивості ґрунтів: найбільш трансформовані зони (поблизу дороги та АЗС) мають нижчу вологість, дещо кислійший pH і менший вміст органічної речовини.

Таблиця показує рівень забруднення ґрунтів важкими металами (Pb, Ni, Cu, Zn) у різних функціональних зонах міста Умань та порівняння з гранично допустимими концентраціями (ГДК).

Свинець (Pb) перевищує ГДК (2,0 мг/кг) у житловій зоні, поблизу дороги та поруч АЗС, причому найбільше накопичення спостерігається поблизу дороги (9,0 мг/кг).

Нікель (Ni) перевищує допустимий рівень у зонах поблизу дороги (5,2 мг/кг) та поруч АЗС (4,8 мг/кг), в той час як у житловій та рекреаційній зонах його концентрація нижча за ГДК.

Мідь (Cu) не перевищує допустимий рівень у жодній зоні, а найвищий показник спостерігається поблизу дороги (2,3 мг/кг).

Цинк (Zn) залишається в межах норми у всіх зонах, найбільше його накопичення у зоні поблизу дороги (5,6 мг/кг).

Таким чином, таблиця чітко ілюструє, що основні джерела техногенного забруднення – транспортні магістралі та АЗС – є зонами найбільшого накопичення важких металів. Житлова та рекреаційна зони мають відносно чистіші ґрунти, хоча Pb перевищує

норму навіть у житловій зоні, що вказує на потребу контролю та рекультивацийних заходів.

Показує значення pH ґрунтів у різних функціональних зонах міста Умань: житловій зоні, поблизу дороги, поруч АЗС та рекреаційній зоні. Найвищий рівень pH спостерігається в рекреаційній зоні (7,4), а найнижчий – поруч АЗС (7,0), що свідчить про вплив техногенного забруднення на кислотно-лужний баланс ґрунтів. Житлова зона має pH 7,3, а поблизу дороги – 7,1, демонструючи помірне зниження через транспортне навантаження. Загальна тенденція графіка свідчить, що зони з більш інтенсивним антропогенним впливом характеризуються дещо кислішою реакцією ґрунтів, тоді як рекреаційні та житлові території зберігають більш нейтральний рівень pH.

На графіку показано зміну вмісту органічної речовини в ґрунтах залежно від типу території.

У житловій зоні вміст органічної речовини становить близько 3,8%.

Поблизу дороги спостерігається зниження до приблизно 3,5%.

Поруч АЗС зафіксовано найнижче значення – близько 3,2%, що може свідчити про негативний вплив антропогенних факторів.

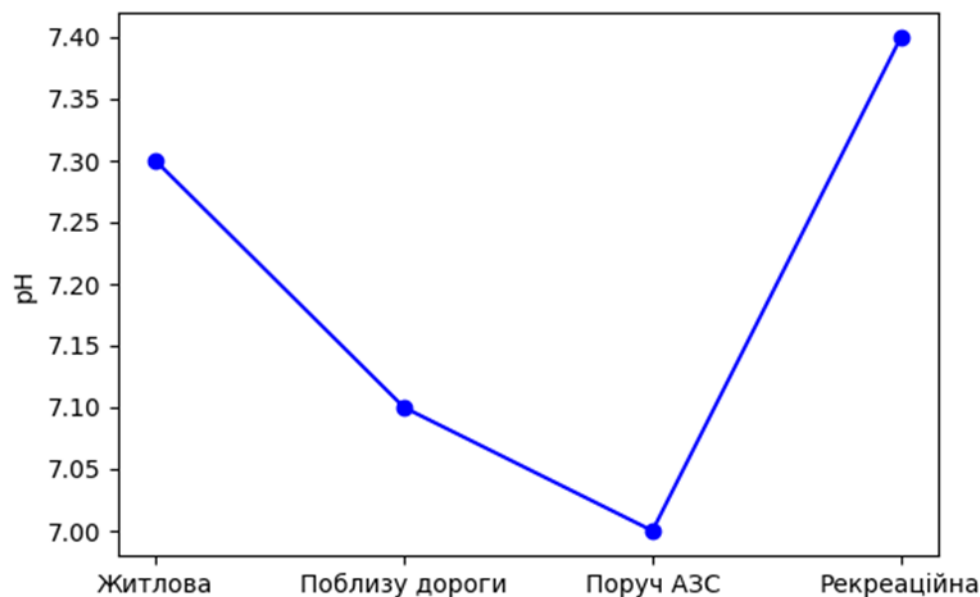
У рекреаційній зоні вміст органічної речовини є найвищим – близько 4,1%, що вказує на більш сприятливий екологічний стан ґрунту.

Загалом графік демонструє зменшення органічної речовини в зонах з інтенсивним техногенним навантаженням і її підвищення в менш забруднених територіях.

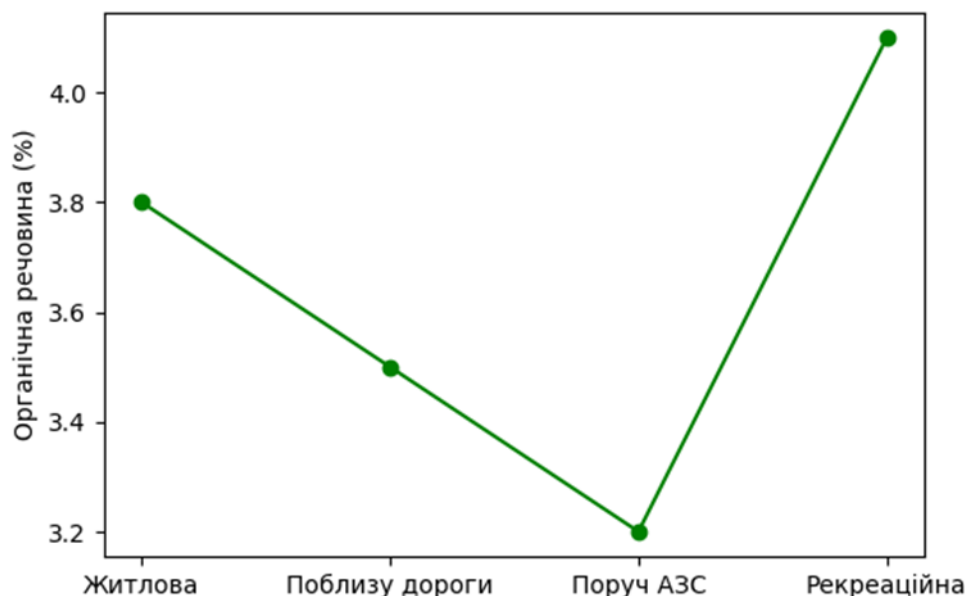
Графік відображає концентрацію свинцю (Pb) у ґрунтах різних функціональних зон.

У житловій зоні концентрація Pb становить близько 3,2 мг/кг.

Поблизу дороги зафіксовано різке зростання до приблизно 9,0 мг/кг, що є максимальним значенням.



Графік 1. рН ґрунтів за зонами



Графік 2. Вміст органічної речовини (%)

Поруч АЗС концентрація залишається високою – близько 8,6 мг/кг.

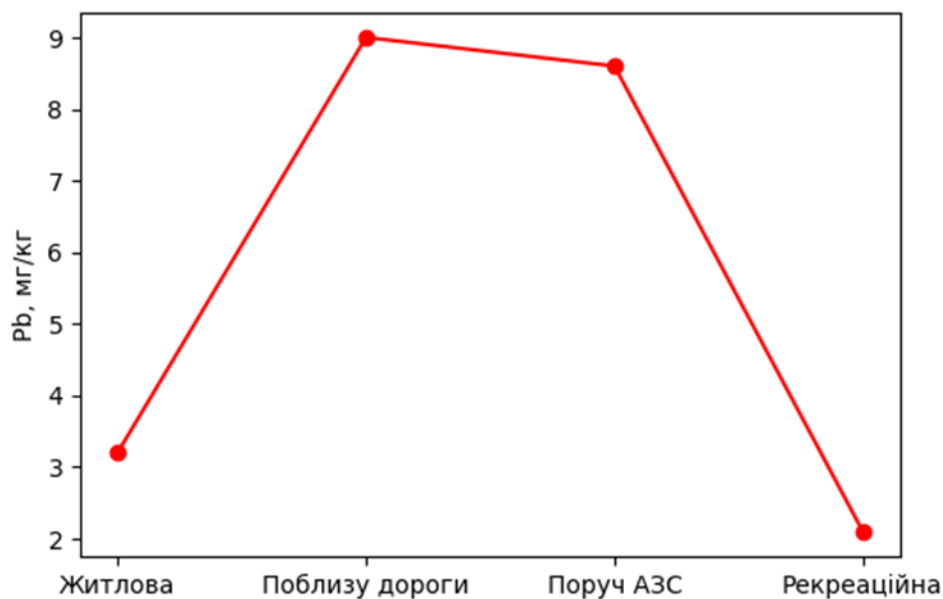
У рекреаційній зоні рівень Рв є найнижчим – близько 2,1 мг/кг.

Графік чітко показує, що найбільше забруднення свинцем характерне для територій з інтенсивним транспортним та техногенним впливом, тоді як рекреаційні зони мають мінімальні показники.

**Головні висновки.** В ході дослідження проведено комплексну оцінку стану ґрунтів міста Умань під впливом техногенного забруднення та визначено пріоритетні зони ризику для урбанізованих екосистем. Розроблено інтегрований підхід до аналізу ґрунтового покриву, який поєднує принципи загальної та

ландшафтної екології, оцінку екологічної вразливості територій, фізико-хімічний та хімічний аналіз ґрунтів, а також використання геоінформаційних систем для просторового моделювання забруднення.

Результати показали, що найбільше накопичення важких металів та нафтопродуктів спостерігається поблизу магістралей і АЗС, тоді як житлові та рекреаційні зони характеризуються нижчими концентраціями забруднювачів та кращими фізико-хімічними показниками ґрунтів. Використання інтегрованої системи дозволило простежити просторову диференціацію забруднення, оцінити екологічну стійкість різних функціональних зон міста та визначити потенційні ризики для урбоекосистем.



Графік 3. Концентрація Рb у ґрунтах

**Перспективи використання результатів дослідження.** Результати дослідження стану ґрунтів міста Умань під впливом техногенного забруднення можуть бути використані для підвищення ефективності системи моніторингу та управління екологічною безпекою в міських урбоекосистемах. Запропоновані методи комплексної оцінки фізико-хі-

мічних властивостей ґрунтів, концентрацій важких металів та нафтопродуктів, а також використання геоінформаційних технологій дозволяють оперативно виявляти забруднені ділянки, оцінювати їхній вплив на стійкість міських ландшафтів і формувати обґрунтовані рекомендації щодо рекультивациі та охорони територій.

#### Література

1. Хохрякова А. І. Ґрунти міст: особливості генезису, класифікації та діагностики. *Вісник Одеського національного університету. Географічні та геологічні науки*, 2016. № 1(28). С. 45–52. DOI: [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2016.1\(28\).90336](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2016.1(28).90336)
2. Yehorova O., Zhytska L., Bakharev V., Mislyuk O., Khomenko E. Assessing the deposition of heavy metals in urban edaphotopes and synanthropic vegetation under technological pollution. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2024. № 3. С. 55–63. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.297718>
3. Василенко О. М., Онищук І. П. Вплив техногенного забруднення на ґрунти санітарно-захисних зон промислових підприємств м. Житомира. *Український журнал природничих наук*, 2025. № 12. С. 112–118. DOI: <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.30>
4. Ольховик Ю. О., Дудар Т. В. Геохімічні особливості забруднення ґрунтів України під час війни. *Геохімія техногенезу*, 2025. Вип. 39. С. 21–29. DOI: <https://doi.org/10.32782/geotech2025.39.02>
5. Ivashchenko A., Andreev V. Problem of soil pollution by heavy metals. *Interdepartmental Thematic Scientific Collection of Phytosanitary Safety*, 2017. Вип. 63. С. 69–76. DOI: <https://doi.org/10.36495/1606-9773.2017.63.69-76>
6. Tonkha O., Menshov O., Litvinov D., Bondar K., Glazunova O., Litvinova O., Pikovska O., Zabaluev V. Assessment of soil pollution levels in southern Ukraine damaged by military actions. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2025. Вип. 108. С. 34–41. DOI: <https://doi.org/10.17721/1728-2713.108.04>
7. Sakun A. O., Kutkovyy D. O. Оцінка впливу наслідків військових дій на ґрунти. *Екологічні проблеми та оцінювання впливів на ґрунтове середовище*, 2025. № 1. С. 56–62. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.1-58.56>

Дата першого надходження статті до видання: 30.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026

## МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОСИСТЕМНИХ ПОСЛУГ ЛІСІВ У КОНТЕКСТІ ОЦІНКИ ПРИРОДНОГО КАПІТАЛУ

Вискушенко Д.А., Никитюк Ю.А.  
Поліський національний університет  
бульв. Старий, 7, 10008, м. Житомир  
[vyskdim@gmail.com](mailto:vyskdim@gmail.com)

У статті обґрунтовано методологічні засади дослідження екосистемних послуг лісів у контексті оцінки природного капіталу як одного з ключових напрямів сучасної еколого-економічної науки та природоохоронного управління. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю подолання фрагментарності підходів до оцінювання неринкових екосистемних вигід і формування уніфікованої науково-методичної рамки, здатної забезпечити інтеграцію екосистемних показників у процеси стратегічного планування, екологічного обліку та прийняття управлінських рішень.

У роботі систематизовано сучасні міжнародні концепції та стандарти дослідження екосистемних послуг і природного капіталу, що використовуються у практиці еколого-економічного аналізу та природоохоронного управління. Запропоновано концептуальний підхід до інтерпретації екосистемних послуг лісів як економічно значущих активів, що формують потоки екологічних, соціальних і фінансових вигід у довгостроковій перспективі. Особливу увагу приділено методологічним аспектам поєднання ринкових і неринкових методів оцінювання, а також проблемам адаптації результатів оцінки до практики природоохоронного управління.

Окремо підкреслено, що регулювальні та підтримувальні екосистемні послуги лісів, зокрема кліматорегулюючі, ґрунтозахисні, водорегулюючі та біорегулюючі функції, виступають опосередкованою, але фундаментальною основою збереження біорізноманіття, що дозволяє інтегрувати відповідні аспекти у методологію оцінки природного капіталу без їх виокремлення в самостійний об'єкт аналізу.

Отримані результати формують науково-методичне підґрунтя для розвитку екосистемно орієнтованих підходів до управління лісовими ресурсами, оцінки екологічних ризиків і впровадження стратегічного екологічного планування в умовах сучасних соціально-економічних викликів. *Ключові слова:* екосистемні послуги, природний капітал, методологія наукових досліджень, екосистемний облік, екологічні ризики, стратегічне екологічне планування.

**Methodological foundations of studying forest ecosystem services in the context of natural capital assessment. Vyskushenko D., Nykytiuk Yu.**

The article substantiates the methodological foundations for studying forest ecosystem services in the context of natural capital assessment as one of the key directions of modern environmental-economic science and environmental management. The relevance of the study is determined by the need to overcome the fragmentation of approaches to assessing non-market ecosystem benefits and to develop a unified scientific and methodological framework capable of integrating ecosystem indicators into strategic planning, environmental accounting, and decision-making processes.

The paper systematizes contemporary international concepts and standards for studying ecosystem services and natural capital that are applied in environmental-economic analysis and environmental governance practice. A conceptual approach is proposed for interpreting forest ecosystem services as economically significant assets that generate long-term flows of environmental, social, and financial benefits. Particular attention is paid to methodological aspects of combining market and non-market valuation methods, as well as to the challenges of adapting valuation results to the practice of environmental management.

It is emphasized that regulating and supporting forest ecosystem services (specifically climate regulation, soil protection, water regulation, and bioregulation functions) constitute an indirect yet fundamental basis for biodiversity conservation. This makes it possible to integrate relevant biodiversity-related aspects into the methodology of natural capital assessment without isolating biodiversity as an independent object of analysis.

The results obtained provide a scientific and methodological basis for the development of ecosystem-oriented approaches to forest resource management, environmental risk assessment, and the implementation of strategic environmental planning under current socio-economic challenges. *Key words:* ecosystem services, natural capital, research methodology, ecosystem accounting, environmental risks, strategic environmental planning.



**Постановка проблеми.** У сучасних умовах трансформації підходів до природоохоронної політики та управління природними ресурсами дедалі більшого значення набуває питання коректного наукового дослідження екосистемних послуг як складової природного капіталу. Незважаючи на активне використання поняття «екосистемні послуги» у науковому, управлінському та нормативному дискурсах, методологічні засади їх дослідження залишаються неоднорідними та часто фрагментарними. Це ускладнює інтеграцію результатів оцінювання у процеси стратегічного планування, екологічного обліку та прийняття управлінських рішень.

Особливої складності проблема набуває у випадку лісових екосистем, для яких характерне поєднання продукційних, регулювальних і підтримувальних функцій, що не завжди піддаються прямій кількісній або вартісній інтерпретації. За відсутності чіткої методологічної рамки дослідження екосистемних послуг лісів існує ризик редукації їхньої ролі до окремих показників або спрощених економічних оцінок, що не відображають реальної багатовимірності природного капіталу.

**Актуальність дослідження.** Актуальність дослідження визначається необхідністю формування узгодженого методологічного підходу до аналізу екосистемних послуг лісів у контексті оцінки природного капіталу. В умовах посилення екологічних ризиків, зміни клімату, деградації лісових територій та зростання суспільного запиту на сталий розвиток лісокористування традиційні ресурсно орієнтовані підходи до оцінки лісів виявляються недостатніми, оскільки не дозволяють враховувати регулювальні та підтримувальні функції екосистем, що формують довгострокові суспільні та економічні вигоди [1].

Сучасні дослідження підкреслюють, що ключовою проблемою впровадження концепції екосистемних послуг у практику управління є не стільки відсутність інструментів оцінювання, скільки методологічна неузгодженість між екологічними, економічними та управлінськими підходами, що обмежує можливості практичного використання результатів аналізу в процесі прийняття рішень [2]. У цьому контексті розроблення та уточнення методології дослідження екосистемних послуг лісів виступає необхідною передумовою переходу від декларативного визнання їх екологічної цінності до її системної інтеграції в економічні та управлінські механізми.

**Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.** Дослідження безпосередньо пов'язане з актуальними науковими завданнями розвитку еколого-економічної теорії, зокрема у частині осмислення природного капіталу як об'єкта наукового аналізу та управління. Запропонований методологічний підхід спрямований на подолання розриву між теоретичними моделями екосистемних послуг і практичними потребами природоохоронного управління.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання її результатів під час розроблення стратегічних документів у сфері лісового господарства, екологічної політики та просторового планування, а також у процесах екологічного обліку, оцінки екологічних ризиків і стратегічної екологічної оцінки. Така спрямованість узгоджується з пріоритетами державної політики у сфері управління лісами, де підкреслюється необхідність екосистемно орієнтованих підходів і підвищення якості планування та управлінських рішень [3]. Крім того, розвиток міжнародної практики екосистемного обліку як статистично та методологічно стандартизованого інструменту підтримки прийняття рішень актуалізує потребу у чітких дослідницьких протоколах і методологічній узгодженості результатів оцінювання екосистемних послуг [4].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У науковій літературі останніх десятиліть спостерігається стійке зростання інтересу до проблематики екосистемних послуг та природного капіталу, що зумовлено розвитком екосистемного підходу в екологічній політиці та управлінні природними ресурсами [5, 6]. Значна частина досліджень зосереджується на класифікації екосистемних послуг, розробленні методів їх вартісної оцінки та аналізі окремих прикладних кейсів, зокрема у контексті землекористування, територіального планування та оцінки екосистемних вигід для суспільства [7].

Водночас у багатьох публікаціях домінує інструментальний підхід, орієнтований на отримання кількісних або вартісних показників, тоді як методологічні питання побудови дослідження (вибору аналітичних рамок, поєднання різних типів даних, інтерпретації результатів та визначення меж їх застосування у практиці управління) часто залишаються поза фокусом уваги або розглядаються фрагментарно [8].

У сфері лісових екосистем переважають дослідження, спрямовані на оцінку окремих функцій, зокрема вуглецевого депонування, рекреаційного потенціалу або ресурсної продуктивності лісів [9]. Такі підходи, незважаючи на їх прикладну цінність, не завжди забезпечують цілісне бачення лісових екосистем як багатофункціональних природних систем, інтегрованих у соціо-еколого-економічний простір, та ускладнюють використання результатів оцінювання для комплексного природоохоронного управління.

В українських наукових дослідженнях проблематика екосистемних послуг також поступово інтегрується у фаховий дискурс, однак основна увага зосереджується на окремих екологічних або економічних аспектах, без достатнього опрацювання методологічних засад їх комплексного дослідження в контексті оцінки природного капіталу [10].

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Незважаючи на наявність

значного масиву наукових досліджень, присвячених екосистемним послугам і природному капіталу, недостатньо опрацьованими залишаються питання методологічної узгодженості дослідження екосистемних послуг лісів у контексті їх комплексної оцінки. У більшості досліджень відсутня методологічно обґрунтована послідовність переходу від визначення екосистемних послуг до їх оцінювання та подальшого використання результатів, що призводить до змішування аналітичних і управлінських рівнів аналізу.

Окремою проблемою є нечітке розмежування між науковими цілями дослідження екосистемних послуг і прикладними завданнями природоохоронного управління. Це призводить до ситуації, коли результати оцінювання, отримані в межах наукових досліджень, не завжди є адаптованими до потреб стратегічного планування, екологічного обліку або оцінки екологічних ризиків, а самі методи оцінювання використовуються поза межами їх методологічної застосовності.

Недостатньо дослідженим залишається також методологічний аспект інтеграції регульовальних і підтримувальних функцій лісових екосистем у систему оцінки природного капіталу. Саме ці функції формують екологічну стійкість лісових територій і є ключовою передумовою збереження біорізноманіття. Водночас у прикладних оцінках вони часто розглядаються фрагментарно або опосередковано, без належної методологічної інтеграції як повноцінних елементів природного капіталу.

У сукупності зазначені прогалини свідчать про необхідність розроблення узгодженого методологічного підходу до дослідження екосистемних послуг лісів, який би забезпечував логічну послідовність етапів аналізу, коректну інтерпретацію результатів і можливість їх подальшого використання у системі природоохоронного управління.

**Новизна.** Наукова новизна дослідження полягає в розробленні та обґрунтуванні методологічного підходу до дослідження екосистемних послуг лісів, орієнтованого не лише на вартісну оцінку екосистемних послуг, а й на формування цілісної аналітичної логіки дослідження, що забезпечує послідовний перехід від визначення екосистемних послуг до обґрунтованої інтерпретації результатів у контексті управлінських рішень. На відміну від переважно інструментально орієнтованих підходів, у роботі акцентовано увагу на логіці побудови дослідження та умовах застосовності отриманих результатів.

Уперше в межах методології дослідження екосистемних послуг лісів запропоновано концептуальну рамку, що забезпечує інтеграцію екологічних, економічних та управлінських аспектів аналізу з урахуванням багаторівневої структури екологічних функцій і вигід, без редукції складності лісових екосистем до окремих показників. Такий підхід дозволяє коректно враховувати регульовальні та під-

тримувальні функції лісів як повноцінні елементи природного капіталу та створює підґрунтя для їх подальшого використання у стратегічному плануванні й природоохоронному управлінні.

**Методологічне значення.** Методологічне значення роботи полягає у формуванні узгодженої аналітичної логіки дослідження екосистемних послуг, що ґрунтується на чіткому розмежуванні етапів ідентифікації, оцінювання та інтерпретації результатів у контексті оцінки природного капіталу. Такий підхід дозволяє уникнути методологічної фрагментарності досліджень і підвищує відтворюваність та порівнюваність результатів у різних наукових і прикладних контекстах.

Запропонована методологічна рамка орієнтована на інтеграцію екологічних, економічних і управлінських аспектів аналізу без спрощення багатофункціональної природи екосистем. Це забезпечує можливість її застосування не лише у сфері лісового господарства, а й у дослідженнях інших типів екосистем, зокрема у межах стратегічного планування, екологічного обліку та оцінки екологічних ризиків.

Узагальнену логіку запропонованого методологічного підходу до дослідження екосистемних послуг лісів у контексті оцінки природного капіталу подано на рис. 1.

**Викладення основного матеріалу.** Методологія дослідження екосистемних послуг лісів у контексті оцінки природного капіталу має спиратися на чітку аналітичну логіку, що забезпечує послідовний перехід від екологічних характеристик лісових екосистем до управлінсько значущих результатів. У межах такого підходу екосистемні послуги розглядаються не як ізольовані показники, а як потоки екологічних, соціальних і економічних вигід, що формуються на основі природного капіталу лісів.

Важливою методологічною передумовою є розмежування логіки побудови дослідження та окремих методів оцінювання, які застосовуються на різних його етапах. Це дозволяє уникнути зведення складних взаємодій у лісових екосистемах до суто розрахункових процедур і забезпечує коректну інтерпретацію результатів у контексті природоохоронного управління.

Запропонований підхід передбачає поетапне дослідження, що охоплює ідентифікацію екосистемних послуг, формування системи показників, вибір адекватних методів оцінювання та подальшу інтерпретацію результатів з урахуванням управлінських цілей. Узгодженість цих етапів є необхідною умовою інтеграції результатів дослідження у процеси стратегічного планування, екологічного обліку та оцінки екологічних ризиків.

Вибір методів оцінювання доцільно здійснювати з урахуванням природи послуги та доступності даних, поєднуючи ринкові підходи для продукційних послуг із неринковими методами для регульовальних і підтримувальних функцій. При цьому вар-

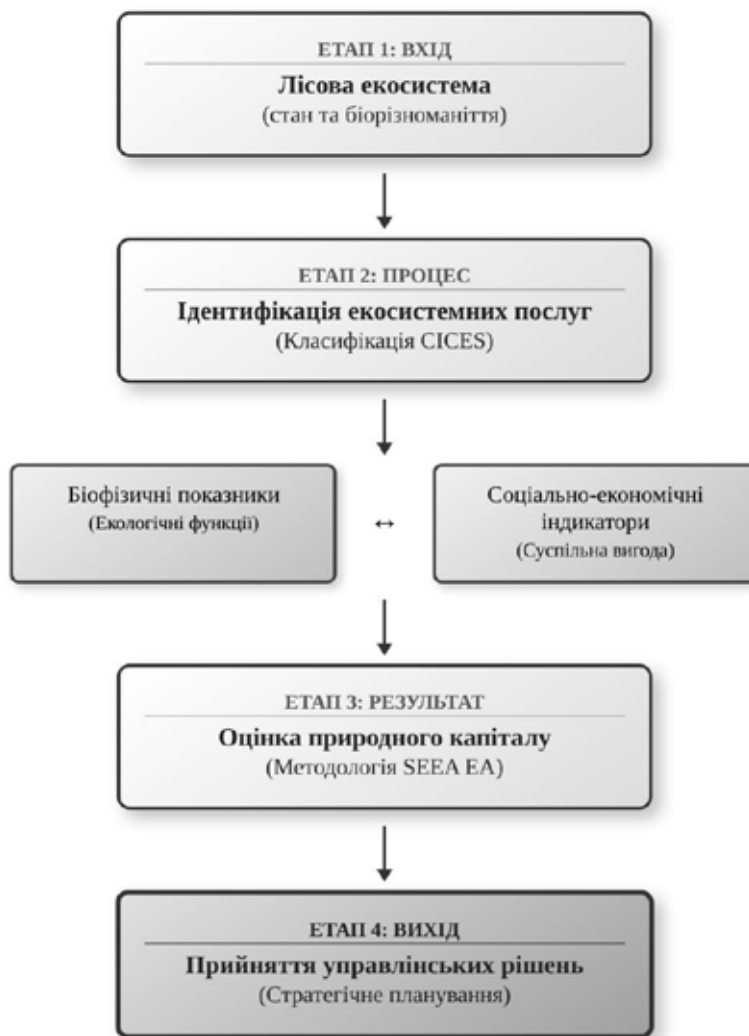


Рис. 1. Методологічна логіка дослідження екосистемних послуг лісів у контексті оцінки природного капіталу.

тісна оцінка розглядається не як універсальна мета, а як один із можливих рівнів інтерпретації поряд із біофізичними та соціально-економічними показниками. Така комбінація підвищує придатність результатів для управлінських рішень без методологічного редукціонізму

Особливістю такого підходу є орієнтація не лише на отримання кількісних або вартісних оцінок, а й на визначення меж їх застосовності. Це дає змогу використовувати екосистемні показники як інструмент підтримки прийняття рішень, а не як самодостатню аналітичну мету.

Власне ідентифікація екосистемних послуг є вихідним і методологічно визначальним етапом дослідження, оскільки саме на цьому рівні формується уявлення про функціональну структуру лісових екосистем і потенційні потоки вигід, які вони забезпечують суспільству. На відміну від формальної класифікації, ідентифікація передбачає аналітичне визначення релевантних екосистемних послуг з урахуванням екологічних характеристик лісів, про-

сторового контексту та управлінських цілей дослідження.

Методологічно важливим є усвідомлення того, що перелік екосистемних послуг не може бути універсальним для всіх типів лісових екосистем і всіх завдань аналізу. Механічне перенесення узагальнених класифікацій без урахування специфіки природно-географічних умов, структури лісових насаджень і характеру антропогенного впливу створює ризик втрати аналітичної релевантності результатів дослідження. Тому ідентифікація екосистемних послуг має здійснюватися в контексті конкретних функціональних ролей лісів у соціо-еколого-економічній системі.

Особливої уваги на цьому етапі потребують регульовальні та підтримувальні функції лісових екосистем, які, на відміну від продукційних послуг, не мають прямого ринкового вираження, але формують основу екологічної стійкості територій. Їх ідентифікація вимагає міждисциплінарного підходу, що поєднує екологічні знання про процеси функціонування

лісів із розумінням соціально-економічних наслідків втрати або деградації цих функцій.

У межах запропонованої методологічної логіки ідентифікація екосистемних послуг розглядається не як попередній формальний етап, а як концептуальна основа всього подальшого дослідження. Саме на цьому рівні закладаються передумови для коректного вибору показників, адекватних методів оцінювання та обґрунтованої інтерпретації результатів у системі природоохоронного управління.

На етапі ідентифікації екосистемних послуг доцільним є використання міжнародних методологічних рамок як інструментів структуризації та термінологічної узгодженості дослідження. У межах запропонованої методологічної логіки такі рамки не розглядаються як універсальні або самодостатні схеми оцінювання, а застосовуються як аналітичні орієнтири, що забезпечують концептуальну цілісність і порівнюваність результатів.

Концепція *Millennium Ecosystem Assessment* (МЕА) відіграє базову роль у формуванні загального уявлення про взаємозв'язок між функціонуванням екосистем, потоками екосистемних послуг і добробутом суспільства. Її використання дозволяє обґрунтувати розгляд екосистемних послуг як результату екологічних процесів, а не як сукупності окремих ресурсів або вигід [11].

Для цілей систематизації та уніфікації термінології на етапі ідентифікації доцільним є застосування *Common International Classification of Ecosystem Services* (CICES). Ця класифікація забезпечує чітке розмежування між типами екосистемних послуг і дозволяє уникнути змішування екологічних функцій, послуг і вигід, що є поширеною проблемою у прикладних дослідженнях [12]. Водночас у межах даного дослідження CICES використовується не як жорстка схема, а як гнучкий інструмент упорядкування ідентифікованих послуг з урахуванням специфіки лісових екосистем.

Інтеграція ідентифікованих екосистемних послуг у контекст оцінки природного капіталу здійснюється з урахуванням положень *System of Environmental-Economic Accounting – Ecosystem Accounting* (SEEA EA). Ця рамка забезпечує методологічний зв'язок між екологічними показниками та системою економічного обліку, що є критично важливим для подальшої інтерпретації результатів у площині управлінських рішень і стратегічного планування [13].

У запропонованій методології міжнародні рамки виконують взаємодоповнювальні функції: МЕА формує концептуальну основу, CICES забезпечує структуризацію ідентифікації, а SEEA EA створює міст між екосистемними показниками та системою управління природним капіталом (табл. 1).

Формування системи показників є ключовим етапом переходу від якісної ідентифікації екосистемних послуг до їх подальшого аналізу та інтерпретації. У межах запропонованої методологічної логіки показники розглядаються не як універсальні числові величини, а як аналітичні інструменти, що відображають різні аспекти екосистемних послуг залежно від цілей дослідження.

Методологічно доцільним є розмежування біофізичних показників, які характеризують стан і функціонування лісових екосистем, та соціально-економічних індикаторів, що відображають значущість екосистемних послуг для суспільства. Таке розмежування дозволяє уникнути прямого отождолення екологічних процесів із їх вартісними оцінками та забезпечує гнучкість подальшого аналізу.

Особливе значення у системі показників мають регульовальні та підтримувальні екосистемні послуги лісів, для яких прямі ринкові аналоги, як правило, відсутні. У цьому випадку показники виконують не лише розрахункову, а й інтерпретаційну функцію, дозволяючи відобразити роль таких послуг у забезпеченні екологічної стійкості територій, зниженні екологічних ризиків і збереженні біорізноманіття.

У контексті оцінки природного капіталу важливим є узгодження системи показників із вимогами екосистемного обліку. Це передбачає відбір таких індикаторів, які можуть бути використані для агрегування результатів, просторового аналізу та подальшої інтеграції у стратегічні документи і процеси прийняття управлінських рішень. Водночас запропонований підхід не зводить оцінку природного капіталу виключно до вартісних показників, а розглядає їх як один із можливих рівнів інтерпретації екосистемних вигід. Запропонована методологія розглядає вартісну оцінку як інструмент інтерпретації та порівняння управлінських альтернатив у стратегічному плануванні, що застосовується після аналізу біофізичних показників і не підміняє собою оцінку екологічних процесів.

Формування системи показників у межах запропонованої методології забезпечує зв'язок між екологічними характеристиками лісових екосистем,

Таблиця 1

## Роль міжнародних методологічних рамок у дослідженні екосистемних послуг лісів

Методологічна рамка	Основна функція	Методологічна функція
МЕА	Концептуальна	Визначення взаємозв'язку між екосистемами та добробутом
CICES	Класифікаційна	Структуризація ідентифікації екосистемних послуг
SEEA EA	Обліково-управлінська	Інтеграція результатів у систему природного капіталу

соціально-економічною значущістю екосистемних послуг і практичними потребами природоохоронного управління.

Інтерпретація результатів оцінки екосистемних послуг є завершальним і водночас критично важливим етапом методологічної логіки дослідження, оскільки саме на цьому рівні відбувається перехід від наукового аналізу до практики управління природним капіталом. У межах запропонованого підходу результати оцінювання розглядаються не як самодостатні числові показники, а як інформаційна основа для обґрунтування управлінських рішень у сфері лісового господарства та природоохоронної політики.

Методологічно важливим є розмежування між науковою інтерпретацією результатів і їх управлінським використанням. Наукова інтерпретація передбачає аналіз отриманих показників з урахуванням екологічних процесів, просторового контексту та обмежень застосованих методів. Управлінська інтерпретація, своєю чергою, спрямована на використання цих результатів у процесах стратегічного планування, екологічного обліку, оцінки екологічних ризиків і розроблення природоохоронних заходів.

Запропонована методологічна логіка дозволяє уникнути прямого перенесення результатів вартісної або кількісної оцінки у сферу управління без належного контекстуального аналізу. Це особливо важливо для екосистемних послуг, що мають регульовальний або підтримувальний характер, де спрощена інтерпретація може призвести до недооцінки довгострокових екологічних ризиків і втрати екосистемної стійкості.

Інтерпретація результатів оцінки екосистемних послуг у межах запропонованого підходу виступає інструментом зниження управлінської невизначеності та підвищення обґрунтованості рішень, а не механізмом формального обґрунтування заздалегідь визначених управлінських дій.

Регульовальні та підтримувальні екосистемні послуги займають особливе місце у методології оцінки природного капіталу лісів, оскільки саме вони визначають довгострокову екологічну стійкість лісових територій і формують передумови для збереження біорізноманіття. На відміну від продукційних послуг, ці функції не мають прямого ринкового відображення, що ускладнює їх включення до прикладних оцінок і часто призводить до їх маргіналізації у процесах прийняття рішень.

У межах запропонованої методологічної логіки регульовальні та підтримувальні послуги розглядаються як повноцінні елементи природного капіталу, що формують базові екологічні умови для реалізації інших екосистемних вигід. Їх інтеграція у систему оцінки не передбачає обов'язкового переведення у вартісну форму, а здійснюється через поєднання біофізичних показників, просторового аналізу та інтерпретації екологічних ризиків.

Такий підхід дозволяє враховувати вплив лісових екосистем на регуляцію клімату, водного режиму, ґрунтових процесів і біологічної рівноваги без виділення біорізноманіття в окремий автономний напрям оцінювання, відірваний від загальної логіки аналізу природного капіталу. Збереження біорізноманіття у цьому контексті постає як інтегральний результат функціонування регульовальних і підтримувальних екосистемних послуг, а не як окремий напрям оцінювання, відірваний від загальної логіки дослідження природного капіталу.

Водночас у логіці SEEA EA біорізноманіття доцільно розглядати передусім як характеристику стану лісового екосистемного активу (*condition*), що визначає його спроможність формувати потоки екосистемних послуг. У цьому сенсі біорізноманіття не вилучається з аналізу, а інтегрується через систему показників стану та через регульовальні й підтримувальні послуги, з якими пов'язана екологічна стійкість території.

Включення регульовальних і підтримувальних екосистемних послуг у методологію оцінки природного капіталу лісів забезпечує перехід від фрагментарних оцінок до системного бачення ролі лісових екосистем у забезпеченні екологічної безпеки та сталого розвитку. Такий підхід узгоджується з сучасними підходами до екосистемного обліку, які розглядають результати оцінювання як інформаційну основу для підтримки управлінських рішень, а не як механізм їх автоматичного визначення. Водночас сучасні оглядові дослідження підкреслюють, що саме коректна інтерпретація екосистемних показників у поєднанні з управлінським контекстом дозволяє зменшити невизначеність і підвищити обґрунтованість рішень у сфері управління природним капіталом і ландшафтами, що є необхідною умовою ефективного природоохоронного управління [14].

**Головні висновки.** У дослідженні обґрунтовано методологічний підхід до вивчення екосистемних послуг лісів у контексті оцінки природного капіталу, що ґрунтується на поетапній аналітичній логіці та чіткому розмежуванні ідентифікації, оцінювання й інтерпретації результатів. Показано, що подолання методологічної фрагментарності є необхідною передумовою інтеграції екосистемних показників у процеси стратегічного планування, екологічного обліку та прийняття управлінських рішень.

Доведено доцільність розгляду екосистемних послуг лісів як потоків екологічних, соціальних і економічних вигід, що формуються на основі природного капіталу, а не як сукупності ізольованих функцій або показників. Обґрунтовано, що використання міжнародних методологічних рамок як взаємодоповнювальних аналітичних орієнтирів, у поєднанні з формуванням системи показників з урахуванням біофізичних і соціально-економічних аспектів, забезпечує коректну інтерпретацію резуль-

татів оцінювання без зведення їх до універсальних вартісних критеріїв.

Показано, що регульовальні та підтримувальні екосистемні послуги лісів є фундаментальною основою екологічної стійкості територій і збереження біорізноманіття, а їх методологічна інтеграція у систему оцінки природного капіталу є необхідною умовою адекватної оцінки екологічних ризиків і довгострокових наслідків управлінських рішень. Отримані результати формують науково-методичне підґрунтя для розвитку екосистемно орієнтованих підходів до управління лісовими ресурсами.

**Перспективи використання результатів дослідження.** Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення методичних підходів до оцінки екосистемних послуг лісів і природного капіталу в цілому, а також для формування науково обґрунтованих інструментів стратегічного екологічного планування. Запропонована методо-

логічна логіка створює передумови для інтеграції екосистемних показників у процеси екологічного обліку, оцінки екологічних ризиків і стратегічної екологічної оцінки. Практичне застосування результатів можливе під час розроблення та коригування програм управління лісовими ресурсами з урахуванням довгострокових екологічних і соціально-економічних ефектів.

Перспективним напрямом подальших досліджень є адаптація запропонованого підходу до завдань екосистемного обліку та моніторингу стану лісових екосистем у контексті змін клімату. Окрему практичну цінність результати мають для міждисциплінарних досліджень, спрямованих на поєднання екологічного аналізу та управлінських рішень. Крім того, отримані напрацювання можуть бути використані у навчальному процесі під час викладання дисциплін екологічного, економічного та управлінського спрямування.

### Література

1. de Groot R. S., Alkemade R., Braat L., Hein L., Willemen L. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity*. 2010. Vol. 7, № 3. P. 260–272. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2009.10.006>
2. Costanza R., de Groot R., Sutton P., van der Ploeg S., Anderson S. J., Kubiszewski I., Farber S., Turner R. K. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*. 2014. Vol. 26. P. 152–158. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002>
3. Про схвалення Державної стратегії управління лісами України до 2035 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 29.12.2021 № 1777-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1777-2021-%D1%80#Text> (дата звернення: 20.01.2026)
4. Edens B., Maes J., Hein L., Obst C., Siikamäki J., Schenau S., Javorsek M., Chow J., Chan J. Y., Steurer A., Alfieri A. Establishing the SEEA Ecosystem Accounting as a global standard. *Ecosystem Services*. 2022. Vol. 54. 101413. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101413>
5. Fisher B., Turner R. K., Morling P. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*. 2009. Vol. 68, № 3. P. 643–653. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.09.014>
6. Costanza R., Daly H. E. Natural capital and sustainable development. *Conservation Biology*. 1992. Vol. 6, № 1. P. 37–46. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1992.610037.x>
7. de Groot R. S., Wilson M. A., Boumans R. M. J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*. 2002. Vol. 41, № 3. P. 393–408. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00089-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00089-7)
8. Spangenberg J. H., Görg C., Settele J. Stakeholder involvement in ESS research and governance: Between conceptual ambition and practical experiences. *Ecosystem Services*. 2015. Vol. 16. P. 201–210. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.10.006>
9. Pan Y., Birdsey R. A., Fang J. et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*. 2011. Vol. 333, № 6045. P. 988–993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
10. Коморна О. М. Теоретико-методичні підходи до оцінювання екосистемних послуг у лісовому господарстві. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2016. Т. 26, № 6. С. 32–38. <https://doi.org/10.15421/40260605>
11. Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington, DC: Island Press, 2005. 155 p. URL: <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf> (дата звернення: 21.01.2026).
12. Common International Classification of Ecosystem Services (CICES). URL: <https://cices.eu> (дата звернення: 21.01.2026).
13. System of Environmental-Economic Accounting – Ecosystem Accounting (SEEA EA). Final report. New York: United Nations, 2021. URL: <https://seea.un.org/ecosystem-accounting> (дата звернення: 21.01.2026).
14. Glass J.H., Waylen K., Reed M.S., Peskett L., Stevens B. Natural capital approaches to decision-making for collaborative landscape governance. *Environmental Science & Policy*. 2025. Vol. 154. 104133. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2025.104133>

Дата першого надходження статті до видання: 27.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026

## ЕКОЛОГІЧНІ РИЗИКИ ІНВАЗІЙНИХ ВИДІВ ТА ШЛЯХИ МІНІМІЗАЦІЇ ЇХНЬОГО ВПЛИВУ НА МІСЦЕВІ ЕКОСИСТЕМИ

Купчак Р.В., Кавчук І.М., Різничук Н.І., Гнезділова В.І.

Карпатський національний університет імені Василя Стефаника  
вул. Шевченка, 57, 77008, м. Івано-Франківськ

[ruslan.kupchak@gmail.com](mailto:ruslan.kupchak@gmail.com), [iryna.kavchuk@gmail.com](mailto:iryna.kavchuk@gmail.com), [nadiia.riznychuk@cnu.edu.ua](mailto:nadiia.riznychuk@cnu.edu.ua),  
[viktoria.gniezditlova@cnu.edu.ua](mailto:viktoria.gniezditlova@cnu.edu.ua)

Інвазійні види є однією з найсерйозніших загроз для біорізноманіття, стійкості та функціонування екосистем. Їхня здатність до швидкого поширення, витіснення аборигенних видів і трансформації середовища призводить до значних екологічних, економічних та соціальних наслідків. У статті представлено результати комплексного дослідження інвазійного навантаження в межах урбоекосистеми м. Івано-Франківськ, що включало інвентаризацію інвазійних видів, оцінку їх поширення, екологічної загрози та можливих шляхів пом'якшення їхнього впливу.

Проведено аналіз природних умов та антропогенного навантаження на досліджувану територію. Встановлено, що найбільш агресивними є види *Acer negundo*, *Solidago canadensis*, *Impatiens glandulifera* та *Ambrosia artemisiifolia*, які утворюють монодомінантні угруповання, пригнічують місцеву флору і змінюють структуру рослинних угруповань. Екологічна оцінка здійснювалась за критеріями: ступінь поширення, здатність до самовідтворення, вплив на аборигенні види, здатність змінювати середовище та порушення екосистемних функцій. Застосовано бальну шкалу для порівняння ступеня загрози різних видів.

Окрему увагу приділено аналізу шляхів проникнення чужорідних організмів – як наслідку глобалізації, транспортних потоків, садово-паркового озеленення, недбалого господарювання. Встановлено, що основними механізмами поширення є інтродукція, акліматизація, випадкове занесення через техніку, будівельні матеріали, воду тощо.

У роботі розглянуто ефективні підходи до пом'якшення інвазійного тиску: механічні методи вилучення, біотехнічні й хімічні заходи, раннє виявлення, систематичний моніторинг, екопросвіта, залучення громад. Рекомендовано адаптувати заходи до локальних умов з урахуванням соціально-екологічного контексту. Результати дослідження є основою для формування регіональних стратегій контролю інвазійних видів, інтеграції науки та управління у збереженні екологічної рівноваги. **Ключові слова:** інвазійні види, втрата біорізноманіття, екологічна стійкість, урбоекосистеми, біологічне вторгнення, екологічна загроза, інтродукція видів, акліматизація, функціонування екосистем, антропогенне навантаження, чужорідні рослини, шляхи поширення, раннє виявлення, екологічний моніторинг, екопросвіта, урбоекологія.

### Ecological risks of invasive species and ways to mitigate their impact on local ecosystems. Kupchak R., Kavchuk I., Riznychuk N., Gniezditlova V.

Invasive species represent one of the most serious threats to biodiversity, ecosystem stability, and ecological functioning. Their capacity for rapid spread, displacement of native species, and transformation of habitats leads to significant ecological, economic, and social consequences. This article presents the results of a comprehensive study of invasion pressure within the urban ecosystems of Ivano-Frankivsk, including the inventory of invasive species, assessment of their distribution, ecological threat level, and potential mitigation strategies.

The study analyzed the natural conditions and anthropogenic pressure of the target area. The most aggressive species identified were *Acer negundo*, *Solidago canadensis*, *Impatiens glandulifera*, and *Ambrosia artemisiifolia*, which form monodominant communities, suppress native flora, and alter vegetation structure. Ecological assessment was based on criteria such as distribution extent, reproduction capacity, impact on native species, environmental transformation potential, and disruption of ecosystem functions. A scoring scale was used to compare the threat levels of various species.

Special attention was given to analyzing the pathways of non-native species introduction, often driven by globalization, transport, ornamental landscaping, and unregulated land use. Key spread mechanisms include deliberate introduction, acclimatization, and accidental transfer via equipment, building materials, and water sources.

The study also explored effective approaches to reducing invasive pressure: mechanical removal, biotechnical and chemical controls, early detection, systematic monitoring, environmental education, and public engagement. The proposed measures should be adapted to local conditions with consideration of the socio-ecological context. The findings form a basis for developing regional strategies for invasive species control and integrating science with environmental management to preserve ecological balance. **Key words:** invasive species, biodiversity loss, ecological resilience, urban ecosystems, biological invasion, ecological threat, species introduction, acclimatization, ecosystem functioning, anthropogenic pressure, alien plants, invasion pathways, early detection, ecological monitoring, environmental education, urban ecology.



**Постановка проблеми.** Інвазійні види рослин і тварин становлять одну з найгостріших проблем сучасної екології, оскільки здатні істотно трансформувати природні екосистеми, витісняючи аборигенні види, змінюючи структуру угруповань, порушуючи кругообіг речовин та знижуючи стабільність біоценозів. Особливо вразливими до інвазій є урбанізовані території, де через інтенсивну господарську діяльність створюються сприятливі умови для поширення чужорідних організмів. Відсутність природних ворогів, адаптивна пластичність і висока репродуктивна здатність інвазійних видів сприяють їхній швидкій натуралізації та експансії.

В Україні проблема біологічних інвазій набула особливої актуальності у зв'язку з глобальними змінами клімату, розширенням міжнародної торгівлі, інфраструктурним розвитком та інтенсивним використанням ландшафтів. Зростаюча кількість чужорідних видів, які натуралізуються і набувають інвазійного характеру, потребує всебічного дослідження їхнього впливу на екосистеми та розробки науково обґрунтованих підходів до мінімізації негативних наслідків.

**Актуальність дослідження.** Біологічні інвазії є однією з основних загроз для глобального біорізноманіття та екологічної рівноваги. За оцінками Міжурядової платформи з біорізноманіття (IPBES), інвазійні види є причиною деградації природних середовищ, втрати аборигенних видів та зниження екосистемних послуг. В умовах стрімкого зростання урбанізованих територій зростає тиск на природні екосистеми, що сприяє проникненню та закріпленню чужорідних видів. Особливої уваги потребують урбоекосистеми, де через щільну мережу шляхів, будівництво, озеленення та зменшення конкуренції інвазійні види швидко натуралізуються.

В Україні ця проблема залишається недостатньо вивченою на регіональному рівні, що ускладнює формування ефективних заходів реагування. Вивчення біоекологічних характеристик інвазійних видів та оцінка їхнього впливу на локальні екосистеми є необхідною передумовою для розробки дієвих заходів контролю та профілактики. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю інтеграції екологічного моніторингу, наукових рекомендацій і практичного природокористування для збереження екосистемної стійкості та адаптації до змін довкілля.

**Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.** Результати дослідження спрямовані на розв'язання актуальних завдань сучасної екології, зокрема щодо збереження біорізноманіття, стабільності місцевих екосистем та мінімізації антропогенного тиску. Робота інтегрує теоретичні засади інвазійної екології з практичними підходами до моніторингу і регуляції біологічних інвазій, що відповідає завданням державної стратегії екологічної політики України до 2030 року. Здійснене дослідження дозволяє сформуванню обґрунтовану

базу для прийняття управлінських рішень на рівні територіальних громад щодо локального реагування на поширення інвазійних видів.

Практична цінність полягає в розробці методичних підходів до оцінювання інвазійного ризику, а також у пропозиції адаптивних стратегій, придатних для реалізації в умовах міського середовища. Отримані результати можуть бути використані в діяльності природоохоронних установ, органів місцевого самоврядування та екологічних ініціатив.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблематика інвазійних видів активно досліджується як на глобальному, так і на національному рівнях. У численних публікаціях розглядаються механізми поширення інвазій, їхній вплив на біорізноманіття, особливості міжвидової конкуренції та зміни структури угруповань. Зокрема, в роботах M. Hulme (2021), D. Simberloff (2019) та S. Richardson (2020) обґрунтовано комплексну загрозу інвазій для стабільності екосистем, а також необхідність розробки превентивних стратегій [7, 9, 10].

В Україні інвазійна тематика представлена в дослідженнях О. Шеляг-Сосонко, О. Ворони та І. Костікова, які акцентують увагу на картуванні поширення інвазійних рослин, визначенні найбільш небезпечних видів та оцінці їхнього впливу на природні угруповання [1, 3, 6]. У роботах Л. Прядка та Л. Гнатюк висвітлено біоекологічні характеристики чужорідних видів, особливості їхньої адаптації до нових умов [2, 4].

Разом з тим, більшість досліджень носять описовий характер або зосереджуються на окремих регіонах без розробки універсальних інструментів оцінювання ризику. Наявний розрив між науковими даними та практичним екологічним управлінням вказує на необхідність створення адаптивних моделей регуляції інвазійного тиску з урахуванням локальної специфіки.

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** Незважаючи на наявність значного наукового доробку у сфері дослідження інвазійних видів, досі залишаються недостатньо вивченими питання локального впливу чужорідних рослин на урбанізовані екосистеми, зокрема у межах малих та середніх міст. Відсутність системного підходу до оцінювання екологічного ризику на рівні міських агломерацій ускладнює прийняття управлінських рішень.

Недостатньо також розроблені інструменти швидкої оцінки ступеня небезпеки інвазійних видів з урахуванням їхньої адаптивності, здатності до самовідтворення та впливу на біоценотичну структуру. Брак методичних рекомендацій щодо інтеграції громадського моніторингу в систему реагування на інвазії є ще однією прогалиною, яка обмежує ефективність природоохоронних заходів.

Стаття присвячена саме цим аспектам: обґрунтуванню підходів до локального аналізу інвазійного

навантаження, формуванню критеріїв оцінки ризику, а також розробці практичних механізмів залучення місцевих громад до контролю поширення небезпечних чужорідних видів.

**Новизна.** У роботі вперше на прикладі урбоєкосистеми м. Івано-Франківськ здійснено поетапну екологічну оцінку інвазійних видів із застосуванням адаптованої бальної шкали, що дозволяє кількісно визначити ступінь їхньої загрози місцевому біорізноманіттю. Запропоновано авторське групування інвазій за рівнем ризику, яке може бути використане як основа для пріоритизації заходів реагування.

Новизною також є інтеграція соціоекологічного підходу в контексті залучення місцевих громад до моніторингу та контролю інвазійного навантаження, що розширює можливості впровадження практичних механізмів екологічного управління на місцевому рівні. Результати дослідження дають змогу формувати рекомендації щодо адаптації глобальних стратегій контролю інвазій до умов конкретних урбанізованих територій.

#### **Методологічне або загальнонаукове значення.**

Методологічна основа дослідження базується на міждисциплінарному підході, що поєднує принципи інвазійної екології, урбоєкології, геоботаніки та соціальної екології. У роботі застосовано адаптовану систему бальної оцінки ступеня інвазійної загрози, що дозволяє кількісно аналізувати вплив чужорідних видів на екосистеми. Це забезпечує можливість об'єктивного ранжування інвазій та обґрунтування заходів управління.

Загальнонаукове значення полягає в удосконаленні підходів до локального екологічного моніторингу, що може бути інтегроване в систему сталого природокористування на рівні територіальних громад. Отримані результати мають потенціал для застосування в інших урбанізованих регіонах, сприяючи адаптації загальнодержавної політики збереження біорізноманіття до регіональних умов.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження проводилося на території урбоєкосистеми м. Івано-Франківськ, зокрема в парках, прибережних зонах, уздовж транспортних коридорів та покинутих ділянок. Основною метою було виявлення інвазійних видів, аналіз їхнього поширення, оцінка екологічного впливу та визначення можливих стратегій мінімізації негативного ефекту.

Проведено інвентаризацію рослинного покриву на 12 ділянках спостереження із застосуванням маршрутно-площадкових методів. Виявлено понад 20 інвазійних видів, зокрема *Acer negundo*, *Solidago canadensis*, *Impatiens glandulifera*, *Ambrosia artemisiifolia*, *Reynoutria japonica*, *Robinia pseudoacacia*. Найбільш агресивні з них формують монодомінантні фітоценози, пригнічують автохтонні види та змінюють структуру угруповань.

Для кожного виду проведено оцінку за п'ятьма критеріями: ступінь поширення, репродуктивна

здатність, зміна умов середовища, вплив на аборигенні види та порушення екосистемних процесів. Кожен критерій оцінювався за п'ятибальною шкалою, що дозволило класифікувати види за ступенем інвазійної небезпеки.

Також здійснено аналіз потенційних шляхів проникнення видів, серед яких: недбале озеленення, використання техніки та транспортних засобів, природне поширення вздовж водотоків і транспортних артерій. У результаті обґрунтовано необхідність регіоналізації управлінських підходів до контролю інвазійних видів, враховуючи локальні екологічні умови та соціальний контекст.

Наведено пропозиції щодо інтеграції механічного, біотехнічного та інформаційного підходів до системи реагування. Запропоновано модель участі громадськості у виявленні нових вогнищ інвазії, що ґрунтується на принципах громадянської науки та екологічної просвіти.

#### **Головні висновки.**

1. Інвазійні види становлять серйозну загрозу для урбанізованих екосистем, спричиняючи витіснення місцевих видів, деградацію природних угруповань та зниження екосистемної стійкості.

2. Найбільш поширеними та небезпечними інвазійними видами в межах м. Івано-Франківськ є *Acer negundo*, *Solidago canadensis*, *Impatiens glandulifera* та *Ambrosia artemisiifolia*, які формують монодомінантні ценози з високим рівнем самовідтворення.

3. Запропонована система бальної оцінки дозволяє об'єктивно визначати рівень інвазійного ризику та пріоритизувати заходи контролю.

4. Основними шляхами проникнення інвазійних видів є недбале озеленення, транспортні потоки, водні об'єкти та інфраструктурні зміни.

5. Ефективна протидія біологічним інвазіям потребує комплексного підходу, що включає механічні, біотехнічні та інформаційні заходи, а також активну участь місцевих громад у моніторингу та реагуванні.

6. Результати дослідження можуть слугувати науковою основою для формування регіональних стратегій екологічної безпеки в контексті збереження біорізноманіття та сталого розвитку урбоєкосистем.

**Перспективи використання результатів дослідження.** Результати дослідження можуть бути використані в практиці екологічного управління на локальному та регіональному рівнях. Запропонована методика оцінки інвазійного тиску дає змогу органам місцевого самоврядування, комунальним службам та екологічним організаціям ефективно планувати заходи контролю та профілактики поширення небезпечних видів.

Модель раннього моніторингу інвазій, що включає участь громадськості, може бути інтегрована у програми громадянської науки, підвищуючи рівень екологічної обізнаності населення та залученість у природоохоронні процеси.

Також результати можуть лягти в основу локальних нормативних актів, програм благоустрою та озеленення, спрямованих на мінімізацію ризиків інтродукції та закріплення чужорідних видів. У нау-

ковому аспекті вони створюють передумови для подальших досліджень щодо адаптації глобальних стратегій контролю інвазій до умов урбанізованих територій України.

#### Література

1. Ворона О. А. Інвазійні види рослин України: поширення та екологічні наслідки. Київ. Логос, 2020. 248 с.
2. Гнатюк Л. І. Біоекологічні характеристики інтродуцентів в умовах міських екосистем. *Вісник Львівського університету. Серія біологічна*. 2019. № 81. С. 112–120.
3. Костікова І. С. Інвазійні види в урбаністичних ландшафтах: методи виявлення. *Наукові записки Тернопільського національного університету. Серія: Біологія*. 2018. № 72. С. 43–49.
4. Прядко Л. С. Роль урбанізованих територій у поширенні інвазійних видів. *Урбоекологія*. 2020. № 3. С. 55–61.
5. Стратегія збереження біорізноманіття України на період до 2030 року. Київ. Міндовкілля, 2021. 80 с.
6. Шеляг-Сосонко Ю. Р. Антропогенна трансформація флори України. Київ. Наукова думка, 2015. 312 с.
7. Hulme P. E. Invasive species: implications for global biodiversity and ecosystem services. *Biodiversity and Conservation*. 2021. Vol. 30. P. 1–17.
8. Global Invasive Species Database. 2023. <https://www.iucngisd.org>
9. Richardson D. M. Fifty years of invasion ecology: the legacy of Charles Elton. Oxford. Wiley-Blackwell, 2020. 456 p.
10. Simberloff D. Invasive Species: What Everyone Needs to Know. Oxford. Oxford University Press, 2019. 256 p.

Дата першого надходження статті до видання: 03.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026

## SPATIO-TEMPORAL STRUCTURE OF THE BIRD ASSEMBLAGE DURING THE WINTER–SPRING TRANSITION: THE ROLE OF TRANSIT ZONES AND DIURNAL ACTIVITY RHYTHMS

Morozova T., Kovhan Ya., Herasymenko M.

Institute of Ecological Restoration and Development of Ukraine

35/2 Vasyl Lypkivskoho St., 02000, Kyiv

[dnu\\_iev@urk.net](mailto:dnu_iev@urk.net)

A comprehensive spatio-temporal analysis of avian assemblages was carried out during the winter–spring transition period (23 February–23 March) at three fixed observation points differing in landscape context and functional role within the migration system. A total of 11 bird species were recorded. The Common Buzzard (*Buteo buteo* Linnaeus, 1758) functioned as the background species throughout the study period, while short-term mass concentrations were characteristic of the Greater White-fronted Goose (*Anser albifrons* Scopoli, 1769) and the Great Cormorant (*Phalacrocorax carbo* Linnaeus, 1758), reflecting episodic migratory pulses.

The spatial distribution of records was markedly heterogeneous. Observation point VP3 acted as a transit zone of seasonal movements and showed the highest total abundance due to mass migratory passages. VP2 exhibited the greatest species richness, likely related to higher structural heterogeneity of the environment and the involvement of a broader spectrum of ecological strategies. In contrast, VP1 was characterized by minimal abundance and diversity, indicating limited functional significance during the studied period.

Temporal analysis revealed a pronounced morning peak in both abundance and species richness between 08:00 and 10:00, corresponding to the overlap of intensive transit migration and local activity of diurnal raptors. This pattern is consistent with established diurnal rhythms of bird activity during transitional seasons. The coexistence of resident, nomadic, and migratory components during peak hours highlights the complex temporal organization of the assemblage.

Integration of spatial and temporal parameters demonstrates a mosaic structure of the avian assemblage, formed through the interaction of local habitat use and participation in large-scale migration flows. The applied spatio-temporal approach, supplemented by flight line parameterization, provides a methodological basis for further assessment of the vertical structure of bird movements, the influence of meteorological factors, and potential risks associated with spatial planning, including the placement of wind energy facilities. The results emphasize the importance of integrated spatio-temporal analyses for understanding avian assemblage dynamics during seasonal transition periods. *Key words:* bird assemblage, winter–spring transition, spatio-temporal analysis, bird migration, diurnal activity, transit zones.

### Просторово-часова структура орнітокомплексу в період зимово-весняного переходу: роль транзитних зон і добових ритмів активності. Морозова Т.В., Ковган Я.О., Герасименко М.В.

Здійснено просторово-часовий аналіз структури та динаміки угруповань птахів у період зимово-весняного переходу (23 лютого – 23 березня) на трьох стаціонарних пунктах спостережень, що відрізнялися ландшафтними характеристиками та функціональною роллю у системі сезонних міграцій. Під час досліджень зафіксовано 11 видів птахів. Фоновим видом упродовж усього періоду спостережень виступав канюк звичайний (*Buteo buteo* Linnaeus, 1758), тоді як короточасні масові реєстрації були притаманні мігруючим водно-болотним видам, передусім гусці білолобій (*Anser albifrons* Scopoli, 1769) та баклану великому (*Phalacrocorax carbo* Linnaeus, 1758), що свідчить про транзитний характер використання окремих ділянок території.

Просторовий розподіл реєстрацій мав виражену неоднорідність. Пункт VP3 характеризувався найбільшою чисельністю та функціонував як транзитна зона сезонних переміщень птахів, у якій відбувалися концентровані міграційні проходи. Пункт VP2 відзначався найвищим видовим різноманіттям за умов нижчої загальної чисельності, що може бути пов'язано зі структурною неоднорідністю середовища та залученням ширшого спектра екологічних стратегій. Пункт VP1 характеризувався мінімальними значеннями чисельності та видового складу, що засвідчує його обмежене функціональне значення у досліджуваній період.

Часовий аналіз підтвердив наявність чітко вираженого ранкового піку чисельності та видового різноманіття, зумовленого інтенсифікацією транзитних міграційних потоків та локальної активності денних хижих птахів. Інтеграція просторових і часових параметрів означила мозаїчну організацію угруповання птахів, сформовану взаємодією місцевої активності осілих і кочових видів та транзитних міграційних процесів. Запропонований просторово-часовий метод, доповнений параметризацією ліній польоту, в процесі просторового планування формує підґрунтя для подальшого аналізу вертикальної структури міграцій, впливу метеорологічних чинників та потенційних ризиків для птахів, зокрема, під час розміщення об'єктів вітроенергетики. *Ключові слова:* орнітокомплекс, зимово-весняний перехід, просторово-часовий аналіз, міграція птахів, добова активність, транзитні зони.



**Introduction.** Transitional seasonal periods play a key role in shaping the spatial organization of avifauna, as during these times local habitat use is combined with large-scale migratory processes. The winter–spring transition is characterized by increased variability in species composition, abundance, and daily activity rhythms of birds, particularly in regions that function as migration corridors [1,2].

Despite the substantial body of research on migration phenology, the relationship between spatial environmental heterogeneity and the diel structure of bird activity at the local scale remains insufficiently studied. In particular, limited information is available on the functional role of individual sites within the observation area and on the temporal concentration of migratory activity.

The aim of the study is to analyze the spatio-temporal structure of the ornithocomplex during the winter–spring transition period.

**Materials and Methods.** Ornithological observations were conducted within the territory of the Balta Wind Power Plant using three fixed monitoring points (VP1–VP3), selected with consideration of landscape configuration, territorial openness, and potential bird migration corridors. Each monitoring point covered open agricultural landscapes, elements of the ravine network, and linear tree plantations that serve as spatial landmarks for migratory and nomadic bird species.

Bird movements were recorded using the transect method, which enables the assessment of the spatial organization of migratory flows. Transects were positioned taking into account relief features, infrastructure, and landscape elements that may influence flight directions and migration intensity. Flight lines and landscape visibility were documented using photographic records.

Field observations were carried out during daylight hours within standardized time intervals. For each record, the following parameters were documented: date

and time of observation, monitoring point, bird species and abundance, flight direction, and additional spatial characteristics.

Based on these data, a spatio-temporal dataset of variables was compiled for subsequent modelling of spring bird migration:

- **spatial variables:** monitoring point, transect location, flight direction;
- **temporal variables:** date, observation hour, diel interval;
- **biological variables:** species, taxonomic affiliation, number of individuals;
- **derived variables:** migration flow intensity, directional recurrence, and concentration of records within spatial sectors.

This approach makes it possible to move beyond descriptive analysis toward the development of spatio-temporal models that reflect the patterns of migratory flow distribution within the zone of influence of the wind power plant.

**Results.** *Species composition and spatial distribution.* During the period from 23 February to 23 March, 11 bird species were recorded at the three monitoring points (VPs). The assemblage was represented predominantly by diurnal raptors and wetland-associated taxa, which is consistent with the seasonal characteristics of the winter–spring transition period [1,3]. The common buzzard (*Buteo buteo* Linnaeus, 1758) was the background species during the study period, dominating in abundance and being present at all observation points (Table 1).

The spatial distribution of records is characterized by pronounced heterogeneity. The highest total abundance was recorded at point VP3, where, alongside background species, mass aggregations of the Greater White-fronted Goose (*Anser albifrons* Scopoli, 1769) and the Great Cormorant (*Phalacrocorax carbo* Linnaeus, 1758) were

Table 1

**Species composition and abundance of birds recorded at the monitoring points during the winter–spring transition period (23 February–23 March)**

Species	Code	№ sist.	VP1	VP2	VP3	Total
<i>Buteo buteo</i> Linnaeus, 1758	BUTBUT	185	27	21	75	123
<i>Phalacrocorax carbo</i> Linnaeus, 1758	PHACAR	054	–	–	22	22
<i>Anser albifrons</i> Scopoli, 1769	ANSALB	102	–	–	110	110
<i>Ciconia ciconia</i> Linnaeus, 1758	CICCIC	090	1	8	–	9
<i>Ciconia nigra</i> Linnaeus, 1758	CICNIG	091	2	1	–	3
<i>Falco tinnunculus</i> Linnaeus, 1758	FALTIN	220	1	1	–	2
<i>Accipiter gentilis</i> Linnaeus, 1758	ACCGEN	177			1	
<i>Accipiter nisus</i> Linnaeus, 1758	ACCNIS	178			2	
<i>Vanellus vanellus</i> Linnaeus, 1758	VANVAN	310			2	
<i>Ardea cinerea</i> Linnaeus, 1758	ARDCIN	077		1		
<i>Pluvialis apricaria</i> Linnaeus, 1758	PLUAPR	296		7		
<i>Circus macrourus</i> S. G. Gmelin, 1771	CIRMAC	172		1		
<i>Milvus migrans</i> Boddaert, 1783	MILANS	170		1		

observed. This indicates the transit use of this site during seasonal migrations [2].

At points VP1 and VP2, single and low-abundance records prevail, represented mainly by diurnal raptors and individual stork species (*Ciconia ciconia* Linnaeus, 1758; *Ciconia nigra* Linnaeus, 1758), which points to a different functional role of these census points in the spatial organization of territory use. Spatial differences between the points are manifested both in total abundance and species richness (Table 2).

The highest values of total abundance are characteristic of VP3, whereas VP2 exhibits the greatest species diversity, which may be associated with a broader spectrum of ecological niches. VP1 is characterized by minimal values, likely determined by local environmental features and its spatial position relative to the main migration routes. Overall, the spatial distribution of ornithological records reflects a mosaic organization of the avian assemblage, within which zones of local activity coexist with areas of intensive seasonal transit.

**Diurnal activity structure.** The diurnal dynamics of records are characterized by a pronounced unevenness of activity throughout the daylight period (Table 3). The maximum values of total abundance and species richness were recorded in the morning hours, with a peak between 09:00 and 10:00. This interval is driven by mass records of *Anser albifrons* Scopoli, 1769 and high activity of diurnal raptors, which is consistent with typical migratory and trophic rhythms of birds during transitional seasons [3, 4].

During the early morning minimum (08:00), the dominance of *Phalacrocorax carbo* Linnaeus, 1758 results in high abundance under a limited species composition, indicating the passage of compact migratory groups. In the mid-morning period (10:00–11:00), the structure of the avian assemblage stabilizes, with *Buteo*

*buteo* Linnaeus, 1758 dominating as the background species. After 11:00, a decline in total abundance of records is observed; however, during the midday period an increase in species diversity occurs due to the appearance of individual migratory and wetland species, in particular *Pluvialis apricaria* Linnaeus, 1758.

*Integration of spatial and temporal patterns.* The combined spatial and temporal analyses indicate that the structure of the avian assemblage during the winter–spring transition is shaped by the overlap of migratory flows and local activity of resident and nomadic species. The dominance of the common buzzard as a background species is accompanied by episodic mass records of migratory wetland birds, confirming the transit function of the studied area.

Records were conducted along several flight lines, which were used as spatial identifiers of bird activity. This approach provides a methodological basis for further spatial–temporal and vertical analyses of bird movements [5].

**Discussion.** The obtained results indicate the formation of a mosaic spatial–temporal structure of the avian assemblage during the winter–spring transition, which is consistent with classical concepts of seasonal bird migration as a process driven by the interaction of spatial and temporal factors [2]. The dominance of the common buzzard (*Buteo buteo* Linnaeus, 1758) as a background species and episodic mass records of migratory wetland birds reflect the transit nature of the use of certain parts of the territory, similar to spatial patterns of migratory flow organization described for other regions [6, 7].

The pronounced morning peak in abundance and species richness (08:00–10:00) corresponds to contemporary data on the diurnal phenology of bird migratory activity, particularly the increased intensity of movements during morning hours in transitional seasons [8,

Table 2

*Spatial differentiation of avifauna between survey points*

VP number	Total N ind.	Species richness
VP1	31	4
VP2	41	8
VP3	212	7

Table 3

**Diurnal structure of bird records during the winter–spring transition period  
(23 February – 23 March 2025)**

Hour	Total N ind.	Species richness	Dominant species
8	41	3	<i>Phalacrocorax carbo</i> Linnaeus, 1758
9	188	8	<i>Anser albifrons</i> Scopoli, 1769
10	42	4	<i>Buteo buteo</i> Linnaeus, 1758
11	10	3	<i>Buteo buteo</i> Linnaeus, 1758
12	10	4	<i>Pluvialis apricaria</i> Linnaeus, 1758

**Note.** The dominant species was identified based on the maximum number of individuals recorded within the corresponding hour.

9]. The coexistence of mass records of migratory wetland species and high activity of diurnal raptors during this time interval indicates an overlap of local and transit components of the avian assemblage.

At the same time, mass records of *Anser albifrons* Scopoli, 1769 and *Phalacrocorax carbo* Linnaeus, 1758 at VP3 reflect short-term migratory pulses characteristic of transit areas during periods of active spring movement [2]. The high species richness at VP2 under lower total abundance may indicate structural heterogeneity of the environment and the involvement of a broader spectrum of ecological strategies.

Temporal analysis demonstrated that morning hours are crucial for recording both migratory and local bird activity, which is consistent with general patterns of diurnal rhythms during transitional seasons [4]. The combination of spatial and temporal patterns emphasizes the necessity of an integrated spatial–temporal approach to the analysis of ornithological data.

Spatial differences among observation points, particularly the identification of VP3 as a center of mass records, may be обусловлені landscape structure and the spatial position of the site relative to major migration routes, which is consistent with studies addressing the influence of landscape mosaicism on bird movements [10]. A similar approach to interpreting spatial heterogeneity of avifauna has been applied in national studies, particularly in ornithofaunistic monitoring of mountainous areas in the context of environmental justification for the placement of wind energy installations [11].

The application of a spatial–temporal approach supplemented by flight line parameterization creates pre-

requisites for further analysis of the vertical structure of bird movements, including the assessment of flight altitudes and the influence of meteorological factors, which is widely applied in modern migration studies [12].

Subsequent observations during the spring period revealed a significant increase in the complexity of the species composition and spatial–temporal structure of the avian assemblage, which will be addressed in a separate analysis. A comparison of the winter–spring transition and spring periods indicates a consistent transformation of the avian assemblage from a resident–wintering to a migratory–spring type, manifested by increased species diversity, greater spatial–temporal complexity, and changes in the functional role of background species.

**Conclusions.** During the winter–spring transition period, the avian assemblage of the studied area is characterized by a mosaic spatial–temporal organization formed through the interaction of local activity of resident and nomadic species and intensive transit migratory flows. The dominance of *Buteo buteo* Linnaeus, 1758 as a background species is combined with short-term mass records of migratory wetland birds, primarily within transit areas.

The identified morning peak in abundance and species richness (08:00–10:00) confirms the key role of this time interval for recording migratory activity. The integration of spatial and temporal data, supplemented by flight line parameterization, forms a basis for further analysis of the vertical structure of migrations and the assessment of potential risks to birds in the context of spatial planning and the placement of wind energy facilities.

## References

1. Alerstam T. Bird migration. Cambridge : Cambridge University Press, 1990. 420 c.
2. Berthold P. Bird migration: a general survey. Oxford : Oxford University Press, 2001. 266 c.
3. Newton I. The migration ecology of birds. London : Academic Press, 2008, 976 c.
4. Shamoun-Baranes J., Liechti F., van Gasteren H., van Loon E., Bouten W., van Dijk J. Atmosphere–bird interactions and flight behaviour: insights from radar and biologging. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. 2017. Vol. 372, No. 1728. Article 20160247. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0247>.
5. Dokter A. M., Farnsworth A., Fink D., Ruiz-Gutierrez V., Hochachka W. M., Kelling S., Rosenberg K. V. Seasonal abundance and survival of migratory birds. *Journal of Applied Ecology*. 2018. Vol. 55, No. 5. P. 2075–2084. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13191>.
6. Van Doren B. M., Horton K. G. A continental system for forecasting bird migration. *Science*. 2018. Vol. 361, No. 6407. P. 1115–1118. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aat7526>.
7. O'Donnell C. F. J., Sinclear R. S., Powlesland R. G. Patterns of nocturnal migration observed by radar. *Ecography*. 2020. Vol. 43, No. 12. P. 1754–1768. DOI: <https://doi.org/10.1111/ecog.05203>.
8. Gill R. E., Tibbitts T. L., Douglas D. C., Handel C. M., Piersma T. Mechanisms driving phenology of long-distance bird migration. *Science Advances*. 2019. Vol. 5. Article eaar1198. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aar1198>.
9. Horton K. G., Nilsson C., Dokter A. M., Farnsworth A. Phenology and intensity of nocturnal bird migration. *Global Change Biology*. 2020. Vol. 26, No. 3. P. 1156–1164. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14909>.
10. Nilsson C., Dokter A. M., Schmaljohann H. Effects of landscape structure on bird movements. *Ecology Letters*. 2019. Vol. 22, No. 4. P. 605–615. DOI: <https://doi.org/10.1111/ele.13213>.
11. Бондар О. І., Морозова Т. В., Ковган Я., Герасименко М. Орнітофауністичний моніторинг полонини Руна як елемент екологічного обґрунтування розміщення вітроенергетичних установок. *Екологічні науки*. 2025. № 5 (62). Ч. 1. С. 7–13.
12. Bohrer G., Bildstein K. L., Barber D. R. Estimating flight altitude distributions and wind support of migrating birds. *Movement Ecology*. 2018. Vol. 6. Article 30. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40462-018-0143-3>

Дата першого надходження статті до видання: 07.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026

## ОТРУЙНІ РОСЛИНИ У СКЛАДІ ПРИРОДНОЇ ФЛОРИ СТРИЙЩИНИ (ЛЬВІВСЬКА ОБЛАСТЬ)

Павлишак Я.Я.<sup>1</sup>, Коссаk Г.М.<sup>1</sup>, Кречківська Г.В.<sup>1</sup>, Даньків В.Я.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка  
вул. Стрийська 3, 82100, м. Дрогобич

<sup>2</sup>Інститут сільського господарства Карпатського регіону  
Національної академії аграрних наук України  
вул. Грушевського, 5, 81115, с. Оброшине

pavlyshak2210@ukr.net, gr\_kossak@ukr.net, gkrechkivska@gmail.com,  
victoriya2206@ukr.net

Рослини є невід'ємною складовою життя людини. Вони не лише формують наше повсякденне оточення, а й забезпечують харчові та лікувальні потреби. Однак серед представників природної флори трапляються види, що становлять потенційну небезпеку для здоров'я людини. Це отруйні рослини, у тканинах яких містяться токсичні речовини. Отруйними можуть бути як окремі органи рослини, так і вся рослина в цілому. Небезпечні властивості проявляються насамперед під час уживання рослини у їжу, проте в окремих випадках достатньо контакту з рослиною, щоб токсичні хімічні сполуки залишилися на шкірі. Найчастіше від отруєння рослинами страждають діти, які, не усвідомлюючи небезпеки, зривають ягоди, зовні подібні до їстівних, або під час контакту з декоративними рослинами зазнають опіків шкіри рук і обличчя.

У статті представлено еколого-біологічні особливості поширення отруйних рослин у фітоценозах Стрийщини. Проведено систематичний, біоморфологічний і екологічний аналіз. На території дослідження виявлено 41 вид рослин, які належать до 39 родів і 26 родин. Встановлено спектр життєвих форм для зазначених видів. Найбільшу кількість представників серед родин становлять *Ranunculaceae* – 14,6 % видів, на другому місці – *Apiaceae* – 7,3 % видів. Провідні родини вважаються типовими для отруйних видів. Визначені види рослин характеризуються різною рясністю зростання. Дослідження частоти рясності видів (за шкалою Друде) показало, що більшість видів зустрічається поодинокі – 36,6 %, розсіяно – 14,6 %, зникаються надземними частинами – 17,1 %, досить рясно – 7,3 %. Частка рослин, які ростуть дуже рясно та рясно, становить по 12,2 %. Встановлено, що переважаючим флороценотипом є неморальний, який налічує 20 видів (48,8 %). Розподіл отруйних речовин в отруйних рослинах за морфологічними органами показав, що переважна більшість фітотоксинів (36,6 %) міститься в листках. *Ключові слова*: отруйні рослини, токсичність, систематична структура, флора.

### Poisonous plants in the natural flora of the Stryi region (Lviv oblast). Pavlyshak Y., Kossak G., Krechkivska H., Dankiv V.

Plants are an integral part of human life. They not only shape our everyday environment but also provide for our nutritional and medicinal needs. However, among the species of the natural flora, there are some that pose a potential threat human health. These are poisonous plants whose tissues contain toxic substances that pose a threat to the health and lives of humans and animals. Poisonous properties may be found either in individual parts of a plant or in the entire plant as a whole. Dangerous properties are manifested primarily when the plant is consumed as food; however, in some cases, simple contact with the plant is sufficient for toxic chemical compounds to remain on the skin. Children are most often affected by plant poisoning, as they, unaware of the danger, pick berries that resemble edible ones in appearance or suffer skin burns on the hands and face when coming into contact with ornamental plants.

The article presents the ecological and biological features of the distribution of poisonous plants in the phytocenoses of the Stryi region. A systematic, biomorphological and ecological analysis was conducted. A total of 41 plant species were recorded in the study area, belonging to 39 genera and 26 families. The range of life forms for the species was determined. The largest number of representatives among the families belongs to *Ranunculaceae* – 14,6 % of species, followed by *Apiaceae* – 7,3 % of species. The dominant families are considered typical for poisonous species. The plant species we identified exhibit varying abundance of growth. The study of species abundance using the DRUDE scale showed that most species occur singly – 36,6 %, sparsely – 14,6 %, with aerial parts overlapping – 17,1%, and fairly abundantly – 7,3 %. The proportion of plants that grow very abundantly and abundantly is 12,2 % each. It was established that the prevailing florocenotype is the nemoral type, comprising 20 species (48,8 %). The distribution of poisonous substances in toxic plants by morphological parts showed that the majority of phytotoxins (36,6 %) are contained in the leaves. *Key words*: the poisonous plants, toxicity, taxonomic structure, flora.

**Постановка проблеми.** Природна флора Стрийщини характеризується значним різноманіттям видів, серед яких наявні рослини, що містять токсичні речовини й можуть становити небезпеку для здоров'я людини та тварин. Багато з отруйних рослин зовні привабливі або схожі на лікарські й їстівні види, що підвищує ризик їх помилкового використання, особливо серед дітей, туристів. Попри поширеність таких рослин у природних біоценозах Стрийщини, рівень обізнаності населення щодо їх



ідентифікації, властивостей та заходів безпеки залишається недостатнім. Це створює реальну загрозу отруєнь, алергічних реакцій та інших негативних наслідків для здоров'я. Обізнаність щодо отруйних видів рослин та дотримання правил безпечної поведінки з ними є ключовим чинником профілактики цього виду небезпек серед населення.

**Актуальність дослідження.** Отруєння рослинами належить до біологічних небезпек, оскільки багато рослин містять токсичні речовини, що можуть негативно впливати на організм людини. Отруйні властивості рослин визначаються наявністю різноманітних отруйних речовин: алкалоїдів, глікозидів, ефірних олій, смол та інших сполук. Місце локалізації отруйних речовин є нерівномірним у різних частинах рослин: листках, квітках, плодах, кореневищах, коренях тощо [15].

Знання ботанічних ознак отруйних рослин, клінічних проявів отруєння та методів надання першої допомоги є важливим чинником профілактики отруєнь і уражень рослинами та сприяє підвищенню ефективності подальшого лікування. Активне поширення отруйних рослин становить серйозну загрозу для здоров'я населення та може призводити до небезпечних наслідків. Отруєння рослинними отрутами здебільшого трапляється в теплу пору року внаслідок вживання в їжу невідомих або неїстівних рослин, що зовні схожі на їстівні відомі види. Дуже часто отруєння лікарськими рослинами виникає через самолікування [9]. Спостерігаються випадки так званих лікувальних отруєнь під час самолікування настоянками та відварами з отруйних рослин, що виникають при неправильному застосуванні або передозуванні препаратів із конвалії, наперстянки, валеріани, чемериці, чистотілу та інших [8]. Отруєння може виникати і при тривалому перебуванні поблизу заростей або букетів із сильним ароматом квітів, таких як лілія, конвалія, черемха та інших. Воно супроводжується кашлем, задухою, запамороченням і загальною слабкістю [6; 15]. За даними засобів масової інформації, останніми роками зростає кількість випадків отруєнь серед дітей і дорослих, спричинених отруйними рослинами, що підкреслює актуальність їхнього вивчення.

**Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.** Це дослідження є частиною наукової роботи «Моніторинг стану природних, техногенно змінених та урбанізованих екосистем Передкарпаття», що проводилась на кафедрі біології та хімії ДДПУ імені Івана Франка. Результати роботи є основою практичних заходів для збереження природної фіторізноманітності, відновлення та збереження рослинних угруповань.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогодні існує незначна кількість наукових робіт, присвячених отруйним рослинам, у яких переважно подаються фрагментарні дані щодо отруйності окремих видів. Рекомендації щодо використання отруй-

них рослин як лікарських можна знайти в працях відомих українських фітотерапевтів і ботаніків: М.І. Носалія [12], Б.М. Заверухи, В.М. Мінарченко [11], К. М. Векірчика [1], Л. Орлової [13]. Кожен із авторів по-своєму трактує застосування отруйних рослин у медицині. Вони подають ботаніко-морфологічну характеристику рослин, акцентуючи особливості їх використання в народній і науковій медицині. Ряд авторів Н.І. Крецул, В.М. та Джуран [8] подають найбільш поширені і небезпечні синантропні види, які зростають по всій території України.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** Метою даної роботи є вивчення видового різноманіття отруйних рослин околиць села Дроговиж Стрийського району їх таксономічної та екологічної структури.

**Новизна.** Встановлено видове різноманіття отруйних рослин околиць села Дроговиж Стрийського району їх таксономічна та екологічна структура.

Упродовж 2023-2024 років нами було проведено дослідження лісових та лучних фітоценозів в околицях села Дроговиж Стрийського району. Для проведення дослідження були використані маршрутний метод, метод тимчасових пробних ділянок розміром 2x2 м<sup>2</sup>, фотографування, морфологічний та екологічний аналіз, а також камеральні методи. Види ідентифікували за визначником [2] та на ресурсі «iNaturalist» (<https://www.inaturalist.org>). Біоморфологічний аналіз проводили згідно класифікації І.Г. Серебрякова [14]. Кожен вид рослин визначався за належністю до екологічної групи щодо відношення до світла (геліофіт, факультативний геліофіт, сціофіт), вологи (гідрофіт, гідатофіт, мезофіт, ксерофіт) [5]. Ступінь токсичності визначався за шкалою, відповідно до якої виділено групу дуже отруйні, смертельно отруйні та безумовно отруйні рослини. Приналежність рослин до певних флороценотипів визначали за Б.В. Заверухою [7]. Частоту трапляння (рясність) визначали методом прямого обліку за шкалою О. Друде [4].

Виклад основного матеріалу. У результаті дослідження встановлено, що флора налічує 41 вид, які належать до 39 родів, 26 родин та 4 відділів. У видовому складі флори домінують представники відділу *Magnoliophyta* (92,7 %). Водночас відділи *Equisetophyta*, *Polypodiophyta* та *Pinophyta* представлені по одному виду, що становить по 2,4 % від загальної кількості видів. Найбільшу кількість представників має родина *Ranunculaceae* –14,6 % видів, на другому місці родина *Apiaceae* 7,3 %. Слід зазначити, що такі провідні родини є типові для отруйних рослин. Представники родини *Ranunculaceae* містять у своїх тканинах ранункулін, анемонін, протоанемонін, дубильні речовини, серцеві глікозиди [5], тоді як представники родини *Apiaceae* – алкалоїди коніїн, метилконіїн, конгидрин і коніцеїн [5; 11]. Родини *Rhamnaceae*, *Asteraceae*, *Fabaceae*, *Scrophulariaceae*, *Caryophyllaceae* та *Euphorbiaceae* представлені по

два види, що становить по 4,9 % кожна. По одному виду представлені 17 родин, що становить по 2,4 % кожна.

Проведені дослідження частоти трапляння видів (за шкалою Друде) на території дослідження показали, що більшість видів зустрічається поодинокі -36,6 % (*Veratrum lobelianum* Bernh., *Euphorbia cyparissias* L.), розсіяно 14,6 % (*Corydalis cava* L., *Chelidonium majus* L., *Solanum dulcamara* L.). Зникаються надземними частинами – 17,1 % (*Vinca minor* L., *Asarum europaeum* L., *Hedera helix* L. та ін.), досить рясно – 7,3 % (*Equisetum palustris* L., *Heracleum sosnowskyi* Manden. та *Galium verum* L. Частка рослин які ростуть дуже рясно та рясно становить по 12,2 % відповідно. Рослини дуже рясні, суцільно закривають ґрунт: *Caltha palustris* L., *Ficaria verna* Huds., *Impatiens noli-tangere* L. Рослини рясні, їх багато, але перекриття немає: *Tanacetum vulgare* L., *Euphorbia peplus* L. тощо. Співвідношення рясності видів в % представлено на рис. 1.

Аналіз видів за флороцено типами показав, що на території дослідження представлені чотири типи: неморальний, лучний, гігрофільний та рудеральний (рис. 2). Переважаючим флороцено типом є неморальний, який налічує 20 видів (48,8 %): *Daphne mezereum* L., *Impatiens noli-tangere* L., *Aethusa cinapium* L., *Polygonatum odoratum* Mill. та ін. Другим за чисельністю є лучний флороцено тип, який налічує 9 видів (21,9 %): *Digitalis grandiflora* Mill., *Tanacetum vulgare* L., *Saponaria officinalis* L., *Euphorbia peplus* L. та ін. До рудерального флороцено типу належить 7 видів, що становить 17,1%. Ці види трапляються на узбіччях доріг, у засмічених місцях та на антропогенно порушених територіях. До них належать *Chelidonium majus* L., *Heracleum sosnowskyi* Manden,

*Melilotus officinalis* L. та інші. Гігрофільний флороцено тип є найменш чисельним і представлений 5 видами (12,2 %). До них належать *Ranunculus repens* L., *Ranunculus acris* L., *Solanum dulcamara* L., *Caltha palustris* L., *Equisetum palustris* L.

Для виявлення найбільш небезпечних видів ми розподілили їх за групами ступеня отруйності. У результаті проведеного аналізу до першої групи з найвищим ступенем отруйності належать 8 видів, що становить 19,5 % від загальної кількості видів. Вживання рослин із цієї групи може призвести до летальних наслідків. Так, наприклад, при вживанні 10-15 ягід з рослини вовчого лика є смертельною дозою для людини. До другої групи зі середнім ступенем отруйності належить 17 видів, що становить 41,5 % від загальної кількості видів. До них належать *Asarum europaeum* L., *Chelidonium majus* L., *Aethusa cinapium* L. та інші. Умовно малотоксичними рослинами вважаються 16 видів (39,0 %). Це *Lepidum rudera le* L., *Linaria vulgaris* Mill., *Corydalis cava* L. тощо.

Оскільки однорічні рослини розмножуються насінням, ймовірність отруєння ними є мінімальною. Натомість розмноження багаторічних рослин за допомогою вегетативних органів вимагає обережного ставлення. У вегетативних органах рослин накопичується багато речовин, серед яких вторинні метаболіти виконують роль фітотоксинів.

Ми проаналізували види рослин щодо вмісту токсичних речовин у різних морфологічних органах. Розподіл отруйних рослин за переважною локалізацією фітотоксинів у морфологічних органах показав, що у переважній більшості видів вони зосереджені в листках (36,6 %). До таких рослин належить: *Digitalis grandiflora* Mill., *Solidago virgaurea* L., *Vinca*

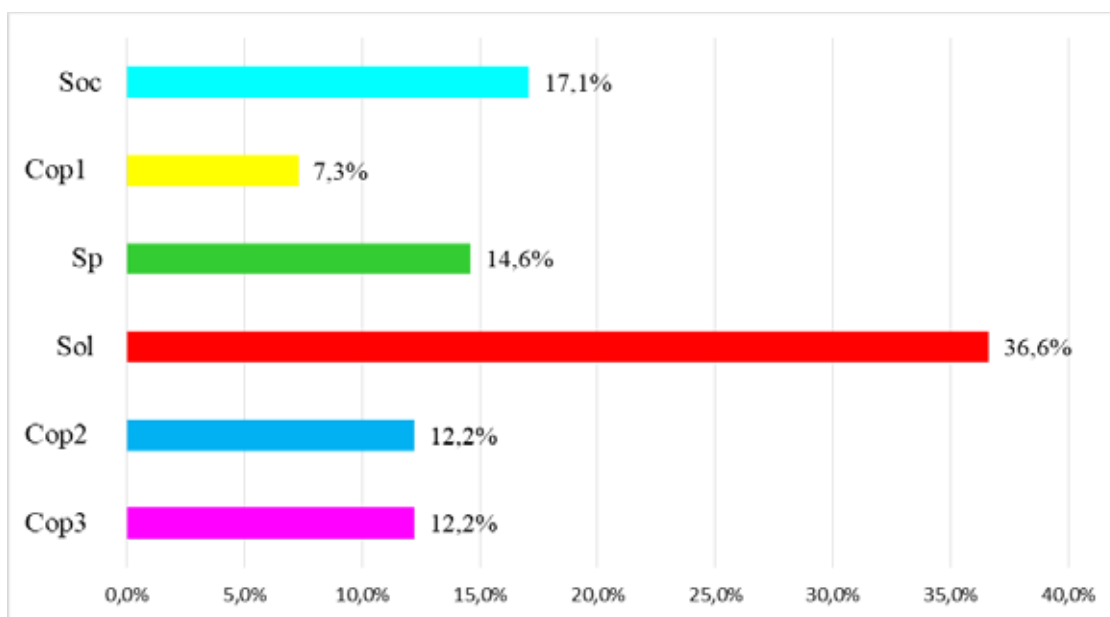


Рис. 1. Рясність отруйних рослин флори села Дроговиж Стрийського району

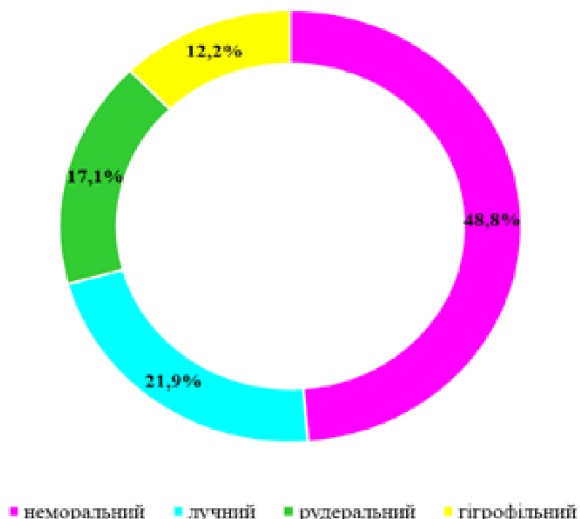


Рис. 2. Співвідношення флороценотипів флори на території села Дроговиж Стрийського району

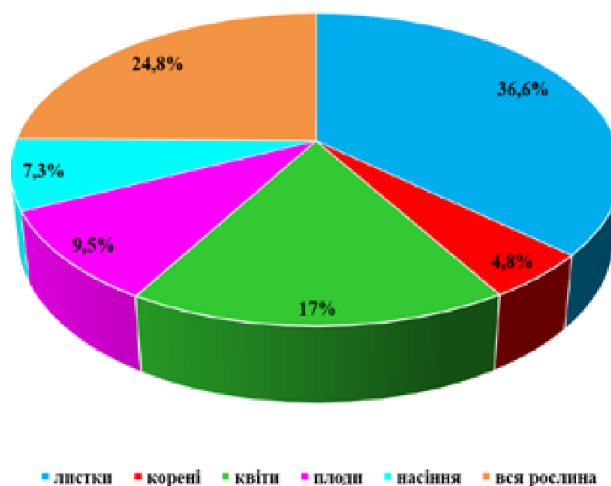


Рис. 3. Вміст токсичних речовин у морфологічних органах рослин

*minor* L. та ін. У коренях накопичується близько 4,8 % токсичних речовин. До рослин, які містять у коренях найбільше токсичних речовин належить *Veratrum lobelianum* Bernh., *Chelidonium majus* L., *Euphorbia cyvarissias* L. тощо. Фітотоксини накопичуються у квітах у 17,0 % рослин (*Padus avium* Lam., *Aethusa cinaapium* L., *Samducus ebulus* L.), а у насінні 7,3 % рослин (*Lupinus polyphyllus* Lindl., *Caltha palustris* L., *Conium maculatum* L.). У плодах 9,5 % рослин (*Hedera helix* L., *Juniperus communis* L., *Frangula alnus* Mill. тощо. Токсичні речовини, що містяться у всій рослині, становлять 24,8 % (*Heracleum sosnowskyi* Manden., *Tanacetum vulgare* L., *Corydalis cava* L. та ін) (рис. 3).

Аналіз біоморф отруйних рослин показав, що найчисельнішою групою є багаторічні рослини – 23 види (56,1 %). До них належать *Ranunculus acris* L., *Lupinus polyphyllus* Lindl, *Samducus ebulus* L.,

*Euphorbia cyvarissias* L. та ін. Друге місце за чисельністю займають монокарпічні рослини, представлені 10 видами (24,5 %), серед яких однорічні рослини – *Euphorbia peplus* L., *Papaver rhoeas* L., *Galium verum* L., дворічні – *Digitalis grandiflora* Mill, *Conium maculatum* L., *Melilotus officinalis* L. та ін. Третє місце за чисельністю займають чагарникові рослини, представлені 4 видами (9,8%). Це *Daphne mezereum* L., *Frangula alnus* Mill, *Juniperus communis* L. та *Rhamnus cathartica* L. Напівчагарникові рослини представлені двома видами (4,8%): *Vinca minor* L. та *Solanum dulcamara* L. Найменш представленими життєвими формами є деревні рослини та ліани – по одному виду (2,4 % кожна) (рис. 4).

На розподіл видів за екоотопами впливають основні екологічні чинники, такі як вологість, ступінь освітлення тощо. У результаті проведеного аналізу видів за відношенням до вологості встановлено, що пере-

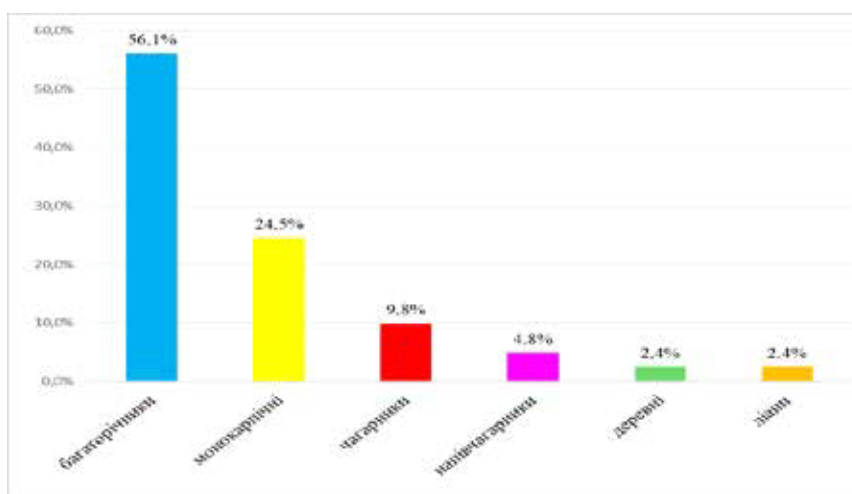
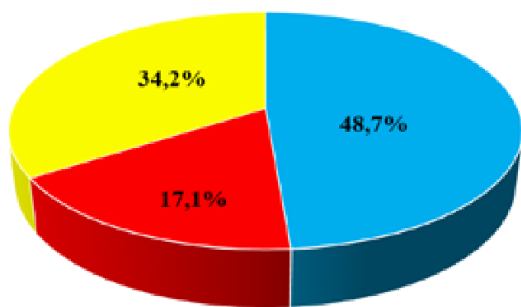
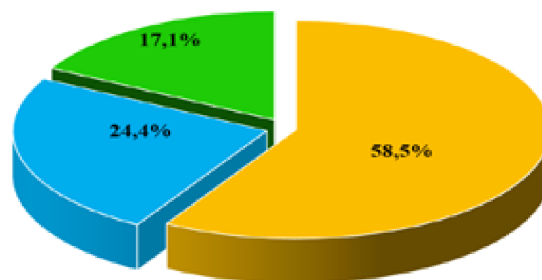


Рис. 4. Розподіл виявлених життєвих форм за І.Г. Серебряковим



■ мезофіти ■ гігромезофіти ■ ксерофіти із ксеромезофітами

Рис. 5. Екологічні групи за відношенням до вологи



■ Геліофіти ■ Сціогеліофіти ■ Геліосціофіти

Рис. 6. Розподіл рослин за геліоморфами

важають мезофіти – 20 видів, що становить 48,7 % (*Rhamnus cathartica* L., *Saponaria officinalis* L., *Padus avium* Lam., *Conium maculatum* L. тощо). Ксерофіти та ксеромезофіти становлять 14 видів або 34,2 %. До них належать *Euphorbia cyparissias* L., *Melilotus officinalis* L., *Aethusa cinapium* L., *Galium verum* L., *Linaria vulgaris* Mill та ін. Найменш чисельною виявилася група гігромезофітів -7 видів, що становить 17,1 % (*Lepidium ruderale* L., *Ranunculus acris* L., *Impatiens noli-tangere* L., *Solanum dulcamara* L. тощо) (рис. 5).

Аналіз відношення рослин до інсоляції показав, що більшість видів належить до геліофітів (рис. 6). За нашими дослідженнями, геліофіти становили 58,5 % (24 види). Серед них – *Tanacetum vulgare* L., *Solidago virgaurea* L., *Ranunculus acris* L., *Consolida regalis* Gray тощо. Другу позицію займає група –сціогеліофітів, яка налічує 10 видів (24,4 %). Це – *Impatiens noli-*

*tangere* L., *Padus avium* Lam., *Lepidium ruderale* L., *Galium verum* L. тощо. Геліосціофіти займають третє місце за чисельністю -17,1 % (7 видів). До них належать *Asarum europaeum* L., *Hedera helix* L., *Vinca minor* L., *Polygonatum odoratum* Mill. тощо.

**Головні висновки.** Таким чином, у результаті проведених досліджень флори околиць села Дроговиж Стрийського району було виявлено 41 вид отруйних рослин, що належать до 39 родів, 26 родин та 4 відділів. Найбільшу кількість представників має родина *Ranunculaceae* –14,6 %, на другому місці родина *Apiaceae* 7,3 % видів.

**Перспективи використання результатів дослідження.** Розширюють знання про видовий склад отруйних рослин флори регіону та сприяють розробці заходів профілактики отруєнь серед населення, а також подальшому поглибленню наукових досліджень у цій галузі.

### Література

1. Векірчик К.М. Отруйні лікарські рослини : посібник-довідник. Тернопіль : Навчальна книга – Богдан, 1999. 144 с.
2. Визначник рослин Українських Карпат / від. ред. В. І. Чопик. Київ : Наук. думка, 1977. 435 с.
3. Доброчасва Д.М., Заверуха Б.В. Ресурси дикорослих лікарських рослин, їх раціональне використання. *Фармацевтичний журнал*. 2006. № 2. С. 10 -13.
4. Друде О. Екологія рослин : навч. посіб. Київ : Фіона-К, 2003. 208 с.
5. Екофлора України / ред. Я.П. Дідух. Київ : Фітосоціоцентр, 2000. 284 с.
6. Екотоксикологія : навч. посіб. / В.В. Снітинський та ін. Херсон : Олді-плюс, 2011. 330 с.
7. Заверуха Б. В. Флора Волино – Поділля та її генезис. Київ : Наук. думка, 1985. 192 с.
8. Крецул Н.І., Джуран В.М. Знання про синантропні отруйні рослини – одна з основ запобігання біологічної небезпеки. *Молодий вчений*. 2017. № 9.1 (49.1). С. 101-104.
9. Коновалова О. Ю., Туманова В.А. Отруйні рослини : навч. посіб. Київ : Видавництво поліграфічного центру Київського університету, 2011. 494 с.
10. Мироненко І. Небезпечні дарунки спекотного літа. *Надзвичайна ситуація*. 2008. № 7. С. 52-54.
11. Мінарченко В.М. Ресурси лікарських рослин в Україні. *Український ботанічний журнал*. 2000. № 1. С. 21–26.
12. Носаль І. М. Від рослини – до людини : розповіді про лікувальні та лікарські рослини України. Київ : Веселка, 1998. 606 с.
13. Орлова Л. Ознайомлення з отруйними рослинами на уроках біології. *Біологія і хімія в школі*. 2002. № 3. С. 16 -19.
14. Серебряков І. Г., Чернова О.М. Життєві форми рослин. Київ : Лібра, 1986. С. 94 -103.
15. Чернишенко Н.Ю. Отруйні рослини й рослинні отрути. *Біологія*. 2008. № 12. С. 10 -18.

Дата першого надходження статті до видання: 21.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГОМОДЕРНІЗАЦІЇ БУДІВЕЛЬ ВРАХУВАННЯМ ФАКТОРУ КЛІМАТИЧНИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Коваленко Ю.Л.<sup>1</sup>, Полив'янчук А.П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова  
вул. Черноглазівська, 17, 61002, м. Харків

<sup>2</sup> Вінницький національний технічний університет  
Хмельницьке шосе, 95, 21021, м. Вінниця

[kovalenkoy55@gmail.com](mailto:kovalenkoy55@gmail.com), [polyvianchuk\\_a@vntu.edu.ua](mailto:polyvianchuk_a@vntu.edu.ua)

Запропоновано метод визначення оптимальних характеристик утеплення зовнішніх стін будинків з урахуванням кліматичних характеристик території розташування будинку, а також технічних параметрів та показників, що визначають рівень енергоефективності об'єктів досліджень – технічних комплексів «будівля-система теплозабезпечення», а саме: індивідуальних конструктивних особливостей кожного шару зовнішніх стін будинку; теплотехнічних властивостей будівельних матеріалів та утеплювачів; технологічних параметрів наявної системи опалення; актуальних цін та тарифів на енергоносії, будівельні матеріали та послуги та ін. В результаті верифікації запропонованого методу встановлено: 1) кліматична варіативність градусо-добі опалювального періоду в межах України (2200–4000) обумовлює зміну оптимальної товщини утеплювача від 80 до 120 мм для мінімізації його терміну окупності; 2) електричне опалення робить термомодернізацію безальтернативно привабливою з терміном окупності до 2–5 років, тоді як при газовому опаленні цей показник становить 9–19 років; 3) найбільш збалансованим матеріалом для багатоквартирних та громадських будівель є мінеральна вата завдяки негорючості та паропроникності, попри довший термін окупності порівняно з пінополістиролом. Запропонований метод рекомендовано для використання при проектуванні та реалізації заходів з утеплення будівель з недостатнім рівнем енергоефективності та для створення спеціалізованого програмного продукту, що дозволить моделювати в динамічному режимі енергетичні баланси технічних комплексів «будівля-система теплозабезпечення» різного призначення. Результати досліджень можуть застосовувати власники приватних будинків, проєктувальники та підрядники житлової забудови, які мають намір утеплити зовнішні стіни будинку та обґрунтувати витрати, визначити оптимальну товщину утеплювача та термін окупності за фактичних умов експлуатації. *Ключові слова:* енергоефективність, утеплення будинків, градусо-добі опалювального періоду, теплоізоляція, термін окупності.

**Increasing the efficiency of buildings energy modernization by taking into account the factor of climatic operating conditions.**  
Kovalenko Yu., Polyvianchuk A.

A method for determining the optimal characteristics of insulation of external walls of buildings is proposed, taking into account the climatic characteristics of the area where the building is located, as well as technical parameters and indicators that determine the level of energy efficiency of research objects – technical complexes “building-heating system”, namely: individual design features of each layer of external walls of the building; thermal properties of building materials and insulation materials; technological parameters of the existing heating system; current prices and tariffs for energy carriers, building materials and services, etc. As a result of verification of the proposed method, it was established: 1) Climatic variability of the degree-day of the heating period within Ukraine (2200–4000) determines the change in the optimal thickness of the insulation from 80 to 120 mm to minimize its payback period; 2) Electric heating makes thermal modernization attractive with a payback period of up to 2–5 years, while with gas heating this figure is 9–19 years; 3) the most balanced material for apartment and public buildings is mineral wool due to its non-flammability and vapor permeability, despite a longer payback period compared to polystyrene foam. The proposed method is recommended for use in the design and implementation of measures to insulate buildings with an insufficient level of energy efficiency and for the creation of a specialized software product that will allow for dynamic modeling of energy balances of technical complexes “building-heating system” for various purposes. The results of the research can be used by owners of private houses, designers and contractors of residential development who intend to insulate the external walls of the building and justify the costs, determine the optimal thickness of the insulation and the payback period under actual operating conditions. *Key words:* energy efficiency, building insulation, heating season degree days, thermal insulation, payback period.

**Постановка проблеми.** Чинні норми щодо теплотехнічних характеристик зовнішніх стін будинків не надають обґрунтування економічного ефекту

термомодернізації, враховують лише 2 кліматичні зони не зважаючи на те, що в межах кожної з них кліматичні характеристики можуть суттєво відрізня-



тися. Діючі вітчизняні норми також не враховують вартість отриманої енергії, будівельних матеріалів і послуг, тип та ефективність наявної системи опалення. З огляду на зростаючу світову увагу до енергетичної ефективності будівельного сектору, потреби в енергії в будівлях слід мінімізувати. У зв'язку з цим розробка будівельних компонентів, що характеризуються належними значеннями коефіцієнта теплопроникності зовнішніх огорожувальних конструкцій, є ключовою стратегією для зменшення річної потреби в енергії [1].

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Дослідження [2] присвячене аналізу впливу градусо-днів опалення для регіону Андалусія (Іспанія) підкреслює критичну важливість визначення градусо-днів, оскільки це безпосередньо впливає на термін окупності інвестицій у термомодернізацію. Робота [3] демонструє важливість точного визначення температури для коректного розрахунку градусо-днів, що є критичним для визначення економічної ефективності заходів з утеплення та прогнозування терміну їх окупності для території вздовж узбережжя Китаю. Результати дослідження [4] підкреслюють необхідність врахування кліматичних характеристик восьми великих містх Індії, при плануванні термомодернізації, оскільки це суттєво впливає на термін окупності інвестицій. Дослідження [5] базується на методології, що включає економічно-енергетичний баланс для мінімізації витрат як на опалення, так і на теплоізоляційні матеріали. Встановлено, що оптимальна товщина ізоляції залежить від трьох ключових факторів: (1) градусо-днів опалення, (2) вартості ізоляційного матеріалу, та (3) вартості палива, що використовуватиметься для опалення будинку протягом десятиліття. Показано, що для кожного періоду часу і в кожному географічному розташуванні регіону у помірному океанічному кліматі оптимальні характеристики утеплення зовнішніх стін відрізняються, що викликає необхідність уточнення будівельних стандартів при плануванні майбутніх проектів. В роботі [6] Було проаналізовано різні типи палива: природний газ, електроенергія, мазут, та чотири теплоізоляційні матеріали: EPS (пінопласт), XPS (екструдований пінополістирол), мінеральна вата, поліуретан. Результати показали, що використання природного газу як джерела опалення та EPS як ізоляційного матеріалу є оптимальним вибором для чотирьох міст Туреччини з різними кліматичними зонами як з фінансової, так і з екологічної точки зору.

**Актуальність дослідження.** Враховуючи вищевикладене слід зазначити актуальність *мети даної роботи* – енергетична та економічна оцінка технологій утеплення зовнішніх стін будинків з урахуванням кліматичних умов, конструктивних і теплофізичних властивостей будівельних конструкцій актуальних цін і тарифів. При цьому розглядаються: *об'єкт дослідження* – втрати тепла через зовнішні непро-

зорі огорожувальні конструкції житлового будинку; *предмет дослідження* – енергетична та економічна ефективність теплової ізоляції зовнішніх огорожувальних конструкцій житлових будинків.

**Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.** Дана робота є продовженням циклу попередніх наукових досліджень авторів, присвячених підвищенню енерго-екологічної безпеки України та спрямованих на вирішення актуальної для світової і вітчизняної економік проблеми нераціонального використання паливних та енергетичних ресурсів в комунальній енергетиці і пов'язаних з цим еколого-економічних наслідків для довкілля та суспільства. Результати досліджень використано при виконанні держбюджетних науково-дослідних робіт: «Підвищення еколого-енергетичної безпеки урбанізованих територій шляхом поетапного раціонального впровадження енергоефективних заходів в сфері тепlopостачання» (ДР № 0123U101998) та «Підвищення ефективності декарбонізації та екологізації комунальної енергетики методом оптимізованого впровадження енергоощадних технологій» (ДР № 0124U001473).

**Наукова новизна дослідження.** Результати дослідження дозволяють визначити оптимальні параметри утеплювача стін, із врахуванням наступних чинників: індивідуальних конструктивних особливостей кожного шару зовнішніх стін будинку; теплотехнічних властивостей будівельних матеріалів та утеплювачів; технологічних параметрів наявної системи опалення; фактичних цін та тарифів на енергоносії, будівельні матеріали та послуги; кліматичних характеристик території розташування будинку та інших факторів.

**Результати дослідження.** Комплексний аналіз кліматичних показників опалювального сезону для обласних центрів України, виконаний на основі чинних норм будівельної кліматології, демонструє наступне. Україна володіє деталізованою нормативною базою, яка дозволяє з високою точністю прогнозувати енергетичні потреби будівель в різних географічних широтах [7]. Показники тривалості сезону від 139 до 186 днів та сума температур опалювального сезону, або градусо-добі опалювального періоду (далі – ГДОП), англійською – HDD, Heating Degree Days від 2237 °С·доба (Севастополь) до 4042 °С·доба (Суми) одиниць свідчать про глибоку кліматичну диференціацію, яка повинна обов'язково враховуватися при розробці заходів з енергоефективності. ГДОП є інтегральним показником, який характеризує суворість клімату та тривалість холодного періоду у конкретній місцевості. Цей показник прямо пропорційний кількості енергії, необхідної для компенсації трансмісійних тепловитрат будівлі через її зовнішню оболонку.

$$\text{ГДОП} = (t_{\text{in}} - t_{\text{h}}) / z,$$

де  $t_{in}$  – розрахункова середня температура внутрішнього повітря будівлі, °С. Згідно з [8], в подальших розрахунках приймається значення +20 °С;

$t_h$  – середня температура зовнішнього повітря за опалювальний період, °С;

$z$  – тривалість опалювального періоду в добах. Це проміжок часу, протягом якого середня добова температура повітря стабільно тримається на рівні + 8 °С.

В таблиці 1 наведено дані для обласних центрів України. Розрахунок ГДОП виконано для базової внутрішньої температури +20 °С, яка є стандартом для житлових приміщень в Україні. Нормативні середні місячні температури зовнішнього повітря визначено згідно з [7].

Згідно з чинними нормативно-правовими актами, територія України поділяється на дві кліматичні зони, для яких встановлено мінімальні значення опору теплопередачі через зовнішні стіни будинків [8] (табл. 2).

Суттєві відмінності кліматичних умов в межах однієї кліматичної зони, а також відмінності у вартості заходів з термомодернізації викликають необхідність вирішення таких питань.

Детального дослідження енергетичної та економічної ефективності утеплення з урахуванням:

– кліматичних характеристик території розташування будинку;

– індивідуальних конструктивних особливостей кожного шару зовнішніх стін будинку;

– теплотехнічних властивостей будівельних матеріалів та утеплювачів;

– технологічних параметрів наявної системи опалення;

– актуальних цін та тарифів на енергоносії, будівельні матеріали та послуги.

Формування методології для практичного визначення оптимальних параметрів для кожного конкретного об'єкта.

Провідним критерієм оптимізації визначено термін окупності заходів.

Для проведення досліджень розроблено та застосовано програмний продукт [<https://uteplennya.com/uk/>], якій побудовано з урахуванням вимог чинних Методичних положень щодо розрахунку приведенного опору теплопередачі непрозорих огорожувальних конструкцій, розрахункових теплофізичних характе-

Таблиця 1

Показники опалювального сезону за нормами будівельної кліматології

Обласний центр	Тривалість опалювального сезону, днів	Середня температура повітря, °С	ГДОП (при $t_{in}=20$ °С), °С·доба
Вінниця	183	-0,1	3678
Дніпро	172	-0,6	3543
Донецьк	175	-1,1	3693
Житомир	186	-0,4	3794
Запоріжжя	168	-0,1	3377
Івано-Франківськ	184	0,4	3606
Київ	176	-0,1	3538
Кропивницький	175	-0,6	3605
Луганськ	177	-1,7	3841
Луцьк	185	0,3	3645
Львів	179	0,4	3508
Миколаїв	161	1,4	2995
Одеса	158	1,9	2860
Полтава	179	-1,1	3777
Рівне	188	0,0	3760
Сімферополь	151	2,7	2612
Суми	188	-1,5	4042
Тернопіль	186	0,1	3701
Ужгород	170	1,7	3111
Харків	182	-1,0	3822
Херсон	158	1,5	2923
Хмельницький	188	-0,3	3816
Черкаси	178	-0,5	3649
Чернівці	178	0,7	3435
Чернігів	185	-1,4	3959

**Мінімально допустиме значення приведенного опору теплопередачі огорожувальної конструкції житлових та громадських будівель**

Вид огорожувальної конструкції	Значення $R_{qmin}$ , м <sup>2</sup> ·К/Вт	
	для температурної зони I	для температурної зони II
Зовнішні стінові огорожувальні конструкції	4,00	3,50

ристик будівельних матеріалів та розрахункових значень коефіцієнтів тепловіддачі внутрішньої та зовнішньої поверхонь огорожувальних конструкцій [9].

Річна економія теплової енергії ( $\Delta Q$ , кВт·год/рік) визначалася, як:

$$\Delta Q = \frac{\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right) \cdot A \cdot 24 \cdot ГДОС}{1000},$$

де  $R_1$  – опір теплопередачі стіни до утеплення, К·м<sup>2</sup>/Вт,

$R_2$  – опір теплопередачі стіни після утеплення, К·м<sup>2</sup>/Вт,

$A$  – Площа стіни, м<sup>2</sup>.

Грошова економія за рік ( $S$ , грн/рік):

$$S = \frac{Q \cdot c}{h \cdot \eta},$$

де  $c$  – вартість газу, грн/м<sup>3</sup>,

$h$  – нижча теплота згоряння газу, кВт·год/м<sup>3</sup>,

$\eta$  – к.к.д. системи опалення.

Термін окупності:

$$\tau = K/S,$$

де  $K$  – інвестиції, грн.

**На першому етапі досліджень** проведено аналіз ринку будівельних матеріалів і послуг України [10]-[19].

За результатами можна виділити три типи утеплювачів, які є найбільш розповсюдженими та найчастіше застосовуються для термомодернізації зовнішніх стін житлових будинків.

1. Пінополістирол (Пінопласт, ПСБ/EPS). Це найпопулярніший і найдоступніший за ціною матеріал на українському ринку. Він широко використовується в системах «мокрого фасаду» (під штукатурку) завдяки своїй легкості, простоті монтажу та високим теплоізоляційним властивостям. Основними перевагами є низька вартість та стійкість до вологи, проте він має низьку паропроникність і є горючим матеріалом.

2. Мінеральна (базальтова або кам'яна) вата. Вважається оптимальним вибором для якісного утеплення завдяки своїй негорючості та здатності витримувати температуру понад 1000 °С. Головною особливістю мінвати є висока паропроникність, що дозволяє стінам «дихати», запобігаючи накопиченню вологи всередині конструкцій. Цей матеріал частіше обирають для багатоповерхових будівель, будинків із газобетону та об'єктів з високими вимогами до пожежної безпеки.

3. Екструдований пінополістирол (ЕППС/XPS). Це вдосконалена версія пінопласту з набагато вищою щільністю та механічною міцністю. Завдяки майже нульовому вологопоглинанню та високій довговічності (до 50 років), ЕППС є незамінним для утеплення цокольних частин фасадів, фундаментів, підвалів та віконних укосів. Хоча він дорожчий за звичайний пінопласт, його стабільність у вологому середовищі робить його критично важливим елементом комплексної теплоізоляції будівлі.

Аналіз ринку теплоізоляційних матеріалів України станом на січень 2026 року дозволяє визначити середню вартість комплексного утеплення стін «під ключ». Поняття «під ключ» включає вартість основних та допоміжних матеріалів (утеплювач, клейові суміші, склосітка, дюбелі, ґрунтовка, декоративна штукатурка та фарба), а також виконання повного циклу робіт із монтажу та декоративного оздоблення фасаду.

Нижче наведено огляд цін для трьох найбільш розповсюджених типів утеплювача при товщині шару 100 мм (найбільш енергоефективний стандарт для клімату України).

1. Пінополістирол (Пінопласт, ПСБ/EPS). Це найбільш економічний варіант, який залишається лідером за кількістю замовлень у приватному секторі.

- Діапазон цін: від 950 до 1600 грн/м<sup>2</sup>.
- Середня ціна в Україні: ~1250 грн/м<sup>2</sup>.
- Особливості вартості: ціна залежить від щільності (стандарт – 15–25 кг/м<sup>3</sup>) та типу штукатурки (акрилова чи силіконова).

2. Мінеральна (базальтова або кам'яна) вата. Найкращий вибір з точки зору пожежної безпеки та паропроникності, що робить його обов'язковим для багатоповерхового будівництва та будинків із газобетону.

- Діапазон цін: від 1400 до 3000 грн/м<sup>2</sup>.
- Середня ціна в Україні: ~1850 грн/м<sup>2</sup>.
- Особливості вартості: висока ціна зумовлена значною вагою плит (стандарт – 135 кг/м<sup>3</sup>), що потребує дорожчих клейових сумішей та посиленого кріплення.

3. Екструдований пінополістирол (ЕППС/XPS). Застосовується переважно для цокольних частин фасаду та фундаментів через свою високу механічну міцність та нульове вологопоглинання.

- Діапазон цін: від 1100 до 1800 грн/м<sup>2</sup> (при розрахунку на м<sup>2</sup> стіни).
- Середня ціна в Україні: ~1450 грн/м<sup>2</sup>.

На другому етапі досліджень виконано дослідження оптимальної товщини і терміну окупності утеплення у трьох містах України, які належать до першої кліматичної зони: Київ, Харків, Вінниця.

Оптимальна товщина шару утеплювача  $\delta$  визначалася шляхом мінімізації функції терміну окупності.

Вихідні дані для міста Київ.

Кліматичні дані ГДОС = 3538 °С · доба.

Температура повітря в будівлі – 20 °С.

Площа зовнішніх стін 100 м<sup>2</sup>. Стіни з силікатної цегли товщиною 0,38 м,  $\lambda = 0,87$  Вт/м, оштукатурені цементно-піщаною штукатуркою товщиною 0,03 м,  $\lambda = 0,93$  Вт/м.

Будинок має газовий котел і водяну систему опалення, її ККД 0,9. Нижча теплота згоряння газу: 9,3 кВт · год/м<sup>3</sup>

Утеплення будинку виконується з мінеральної вати. Коефіцієнт теплопровідності мінвати  $\lambda = 0,055$  Вт/м.

Вартість природного газу з урахуванням доставки взято за результатами огляду чинних тарифів для побутових споживачів. Тариф ГК «Нафтогаз України» складає 7,96 грн/м<sup>3</sup>; вартість розподілу для АТ «Київгаз» – 0,384 грн/м<sup>3</sup> (з ПДВ). Загальна вартість – 8,344 грн/м<sup>3</sup> станом на січень 2026 року.

Вартість мінеральної вати, її доставки, монтажу та декоративного оздоблення фасаду взято за результатами огляду ринку будівельних матеріалів і послуг в місті Київ станом на січень 2026 року. Середня ціна комплексного утеплення мінеральною ватою «під ключ» у Києві (матеріали, доставка, монтаж та декоративне оздоблення) розрахована за моделлю: 1350 грн/м<sup>2</sup> (фіксована частина вартості допоміжних матеріалів та робіт) + 5000 грн/м<sup>3</sup> (вартість утеплювача).

Виконано розрахунки для різної товщини шару мінеральної вати в діапазоні від 0,02 до 0,2 м з кроком 0,02 м. Результати надано у таблиці 3.

Найкращий баланс між інвестиціями та швидкістю повернення коштів у Києві забезпечує товщина утеплювача 100 мм. За цих умов, термін окупності утеплення мінеральною ватою складає приблизно 18,4 року. Тривалий термін окупності зумовлено високою вартістю будівельних робіт у столиці. Загальний опір після утеплення  $R = 2,446$  м<sup>2</sup>·°С/Вт, що менше нормативного для першої кліматичної зони.

Нормативний опір, який дорівнює 4 м<sup>2</sup>·°С/Вт досягається при збільшенні товщини утеплювача до 200 мм, що скорочує витрати енергії ще майже на 15 %, але збільшує термін окупності до 20 років.

При прогнозованому зростанні цін на природний газ для населення до ринкового рівня, термін окупності скоротиться.

Дослідження оптимальної товщини і терміну окупності утеплення цього об'єкту для умов міста Харків проведено з урахуванням кліматичних характеристик та актуальних тарифів і цін в цьому регіоні станом на січень 2026 року.

ГДОП становить 3822 °С · доба.

Вартість природного газу з урахуванням доставки ГК «Нафтогаз України» складає 7,96 грн/м<sup>3</sup>; вартість розподілу для Харківської міської філії «Газмережі» – 0,516 грн/м<sup>3</sup> (з ПДВ). Загальна вартість – 8,476 грн/м<sup>3</sup>.

Середня ціна комплексного утеплення мінеральною ватою «під ключ» у Харкові (матеріали, доставка, монтаж та декоративне оздоблення) прийнята за формулою: 950 грн /м<sup>2</sup> (фіксована частина вартості допоміжних матеріалів та робіт) + 5000 грн /м<sup>3</sup> (вартість утеплювача).

Виконано розрахунки для різної товщини шару мінеральної вати в діапазоні від 0,02 до 0,2 м з кроком 0,02 м. Результати надано у таблиці 4.

Найкращий баланс між інвестиціями та швидкістю повернення коштів у Харкові забезпечує товщина утеплювача 80 мм. За цих умов, термін

Таблиця 3

Результати дослідження терміну окупності утеплення залежно від товщини утеплювача в умовах м. Київ

Товщина вати (м)	Загальний опір R (м <sup>2</sup> ·К/Вт)	Річна економія газу (м <sup>3</sup> )	Річна економія (грн)	Інвестиції (грн)	Термін окупності (років)
0,02	0,991	594	4956	145 000	29,26
0,04	1,354	869	7254	155 000	21,37
0,06	1,718	1027	8572	165 000	19,25
0,08	2,081	1130	9428	175 000	18,56
0,10	2,445	1203	10 030	185 000	18,44
0,12	2,809	1256	10 477	195 000	18,61
0,14	3,172	1297	10 822	205 000	18,94
0,16	3,536	1330	11 097	215 000	19,37
0,18	3,900	1357	11 319	225 000	19,88
0,20	4,263	1378	11 501	235 000	20,43

Таблиця 4

**Результати дослідження терміну окупності утеплення  
залежно від товщини утеплювача в умовах м. Харків**

Товщина вати (м)	Загальний опір R (м <sup>2</sup> ·К/Вт)	Річна економія газу (м <sup>3</sup> )	Річна економія (грн)	Інвестиції (грн)	Термін окупності (років)
0,02	0,991	642	5444	105 000	19,29
0,04	1,354	940	7961	115 000	14,44
0,06	1,718	1111	9411	125 000	13,28
0,08	2,081	1222	10 355	135 000	13,04
0,10	2,445	1300	11 020	145 000	13,16
0,12	2,809	1358	11 512	155 000	13,46
0,14	3,172	1403	11 893	165 000	13,87
0,16	3,536	1438	12 191	175 000	14,35
0,18	3,900	1468	12 443	185 000	14,87
0,20	4,263	1491	12 638	195 000	15,43

окупності утеплення мінеральною ватою складає приблизно 13 років. Зменшення терміну окупності зумовлено меншою вартістю будівельних робіт і послуг, ніж у столиці. Загальний опір після утеплення  $R = 2,08 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ , що менше нормативного для першої кліматичної зони.

Збільшення товщини до 200 мм дозволяє досягти нормативного опору теплопередачі, але збільшує термін окупності до 15,4 років.

Дослідження оптимальної товщини і терміну окупності утеплення цього об'єкту для умов міста *Вінниця* проведено з урахуванням кліматичних характеристик та актуальних тарифів і цін в цьому регіоні станом на січень 2026 року.

ГДОП становить  $3678 \text{ °C} \cdot \text{доба}$ .

Вартість природного газу з урахуванням доставки ГК «Нафтогаз України» складає  $7,96 \text{ грн}/\text{м}^3$ ; вартість розподілу для Вінницької філії «Газмережі» –  $0,516 \text{ грн}/\text{м}^3$  (з ПДВ). Загальна вартість –  $10,072 \text{ грн}/\text{м}^3$ .

Середня ціна комплексного утеплення мінеральною ватою «під ключ» у Вінниці (матеріали,

доставка, монтаж та декоративне оздоблення) прийнята за формулою:  $800 \text{ грн}/\text{м}^2$  (фіксована частина вартості допоміжних матеріалів та робіт) +  $4000 \text{ грн}/\text{м}^3$  (вартість утеплювача).

Виконано розрахунки для різної товщини шару мінеральної вати в діапазоні від 0,02 до 0,2 м з кроком 0,02 м. Результати наведено у таблиці 5.

Найкращий баланс між інвестиціями та швидкістю повернення коштів у Вінниці забезпечує товщина утеплювача 80 мм. За цих умов, термін окупності утеплення мінеральною ватою складає приблизно 9,5 років. Зменшення терміну окупності зумовлено меншою вартістю будівельних матеріалів, робіт і послуг, ніж у столиці, менш суворою зимою та більшими тарифами за доставку природного газу побутовим споживачам. Загальний опір після утеплення  $R = 2,08 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ , що менше нормативного для першої кліматичної зони.

Збільшення товщини до 200 мм дозволяє досягти нормативного опору теплопередачі, але збільшує термін окупності до 11,1 років.

Таблиця 5

**Результати дослідження терміну окупності утеплення  
залежно від товщини утеплювача в умовах м. Вінниця**

Товщина вати (м)	Загальний опір R (м <sup>2</sup> ·К/Вт)	Річна економія газу (м <sup>3</sup> )	Річна економія (грн)	Інвестиції (грн)	Термін окупності (років)
0,02	0,991	618	6224	88 000	14,14
0,04	1,354	904	9104	96 000	10,54
0,06	1,718	1068	10 760	104 000	9,66
0,08	2,082	1175	11 840	112 000	9,46
0,10	2,445	1251	12 600	120 000	9,52
0,12	2,809	1307	13 165	128 000	9,72
0,14	3,172	1350	13 600	136 000	10,00
0,16	3,536	1384	13 940	144 000	10,33
0,18	3,900	1413	14 230	152 000	10,68
0,20	4,264	1435	14 450	160 000	11,07

На третьому етапі проведено дослідження терміну окупності об'єкту для різних кліматичних умов, враховуючи, що ГДОП в різних регіонах України змінюється від 2200 до 4000 °С·доба. Для кожного значення ГДОП визначено оптимальну товщину шару утеплювача, виходячи з мінімального терміну окупності заходів з утеплення. Застосовано середні в Україні ціни станом на 2026 рік, на утеплення зовнішніх стін будинків утеплювачами, які є найбільш розповсюдженими та найчастіше застосовуються для термомодернізації зовнішніх стін житлових будинків в Україні. Результати надано у таблиці 6 для трьох найбільш розповсюджених типів утеплювача при оптимальній товщині шару, яка визначалася окремо для кожного випадку.

Наочну інтерпретацію результатів дослідження терміну окупності заходів з утеплення об'єкту за умови товщини утеплювача, що забезпечує найшвидше повернення інвестицій для кожного кліматичного режиму наведено на діаграмі (рис. 1).

Зі зростанням суворості клімату (збільшенням ГДОП) оптимальна товщина шару утеплювача збільшується. У регіонах з ГДОП > 3600 фінансово вигідніше монтувати товстіші шари (120-140 мм), оскільки висока економія на опаленні швидше перекиває додаткові витрати на матеріал.

При низьких значеннях ГДОП оптимальною залишається товщина 80 мм. Це пояснюється тим, що при менших тепловтратах подальше потовщення шару не дає достатньої додаткової економії, щоб компенсувати зростання інвестицій, тоді як занадто тонкий шар (< 50 мм) є неефективним через високу частку вартості робіт у загальному кошторисі.

Пінопласт демонструє найкоротший термін окупності в усіх зонах завдяки найнижчій ціні за одиницю термічного опору. Проте мінеральна вата, попри довший термін окупності (15-27 років), залишається рекомендованою з міркувань пожежної безпеки та паропроникності.

На четвертому етапі досліджень виконано розрахунки за умови використання електричного котла замість котла на природному газі. ККД електричного котла 0,98 (табл. 7). Вартість електроенергії – 4,32 грн/кВт год.

Застосування електричного котла у порівнянні з газовим змінює економічну картину термомодернізації.

Оскільки вартість електричної енергії для населення за діючими тарифами значно перевищує вартість тепла, отриманого з природного газу (приблизно в 4,3 – 4,4 рази за одиницю енергії), термін окупності утеплення скорочується у кілька разів.

Оптимальна товщина шару для мінімізації терміну окупності зміщується у бік більших значень (100–140 мм), оскільки кожний додатковий сантиметр утеплювача економить значно дорожчий ресурс.

**Головні висновки.** В результаті досліджень встановлено наступне: 1) кліматична варіативність градусо-добі опалювального періоду в межах України (2200–4000) обумовлює зміну оптимальної товщини утеплювача від 80 до 120 мм для мінімізації терміну окупності; 2) електричне опалення робить термомодернізацію безальтернативно привабливою з терміном окупності до 2–5 років, тоді як при газовому опаленні цей показник становить 9–19 років; 3) мінеральна вата є найбільш збалансованим матеріалом для багатоквартирних та громадських будівель завдяки негорючості та паропроникності, попри довший термін окупності порівняно з пінополістиролом.

**Перспективи використання результатів дослідження.** Запропонований метод визначення оптимальних характеристик утеплення зовнішніх стін будинків з урахуванням кліматичних умов експлуатації рекомендовано для використання при проектуванні та реалізації заходів з утеплення будівель з недостатнім рівнем енергоефективності та для створення спеціалізованого програмного продукту,

Таблиця 6

Результати дослідження терміну окупності заходів з утеплення об'єкту за умови товщини утеплювача, що забезпечує найшвидше повернення інвестицій для кожного кліматичного режиму

ГДОП, °С·доба	Пінопласт (EPS) δ/ термін окупності	Мінвата (MW) δ/ термін окупності	ЕППС (XPS) δ/ термін окупності
2200	80 мм / 17,9 років	80 мм / 27,6 років	80 мм / 19,9 років
2400	80 мм / 16,5 років	80 мм / 25,3 років	80 мм / 18,2 років
2600	100 мм / 15,2 років	80 мм / 23,3 років	80 мм / 16,8 років
2800	100 мм / 14,1 років	100 мм / 21,7 років	80 мм / 15,6 років
3000	100 мм / 13,2 років	100 мм / 20,2 років	100 мм / 14,6 років
3200	120 мм / 12,4 років	100 мм / 19,0 років	100 мм / 13,7 років
3400	120 мм / 11,6 років	100 мм / 17,9 років	100 мм / 12,9 років
3600	140 мм / 11,0 років	120 мм / 16,9 років	120 мм / 12,2 років
3800	140 мм / 10,4 років	120 мм / 16,0 років	120 мм / 11,5 років
4000	140 мм / 9,9 років	120 мм / 15,2 років	120 мм / 10,9 років

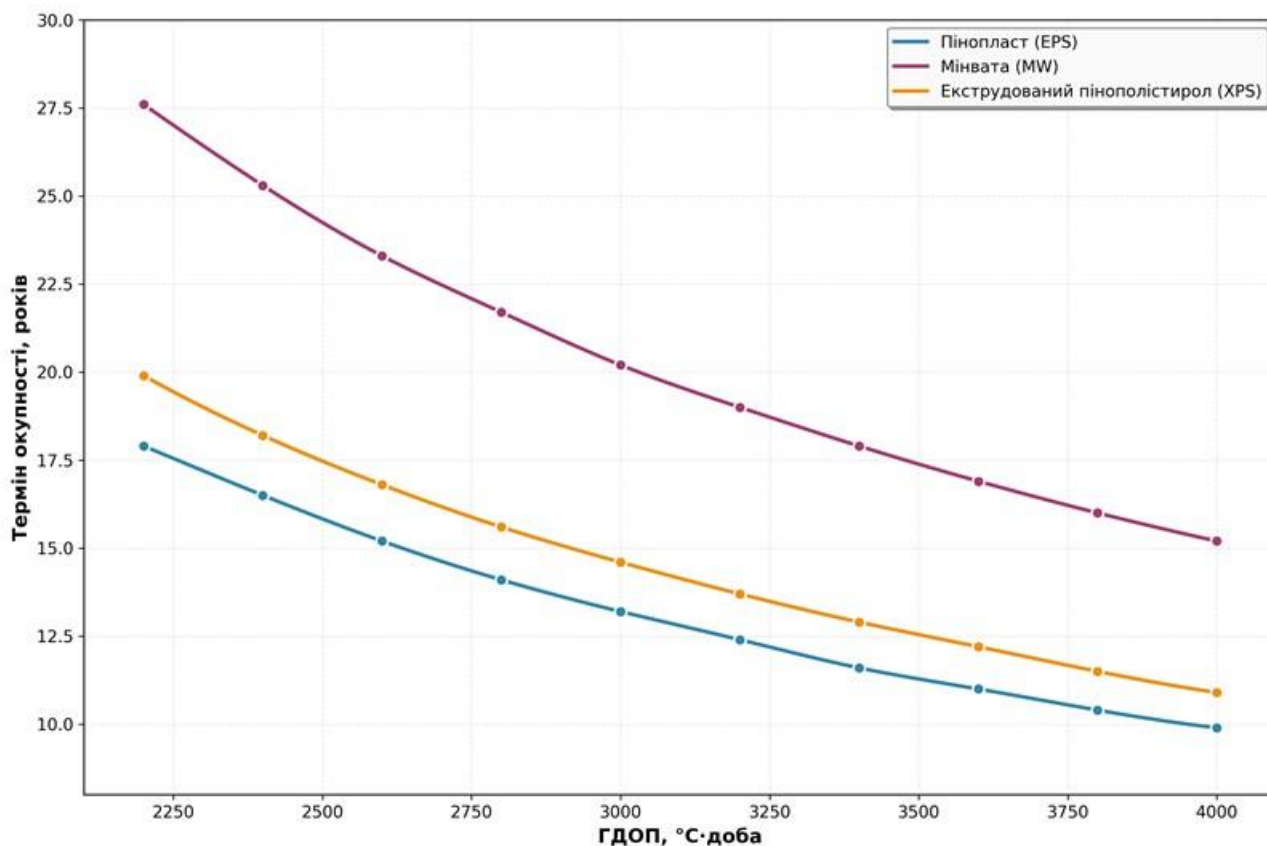


Рис. 1. Залежність терміну окупності утеплювачів від ГДОП

Таблиця 7

Результати дослідження терміну окупності заходів з утеплення об'єкту за умови товщини утеплювача, що забезпечує найшвидше повернення інвестицій для кожного кліматичного режиму у разі використання електричного котла для трьох типів утеплювачів

ГДОП, °С·доба	Пінопласт (EPS) δ/ термін окупності	Мінвата (MW) δ/ термін окупності	ЕППС (XPS) δ/ термін окупності
2200	100 мм / 4,1 року	100 мм / 6,3 року	80 мм / 4,6 року
2400	100 мм / 3,8 року	100 мм / 5,8 року	80 мм / 4,2 року
2600	100 мм / 3,5 року	100 мм / 5,3 року	80 мм / 3,9 року
2800	120 мм / 3,3 року	120 мм / 5,0 років	100 мм / 3,6 року
3000	120 мм / 3,0 року	120 мм / 4,6 року	100 мм / 3,4 року
3200	140 мм / 2,9 року	120 мм / 4,4 року	100 мм / 3,2 року
3400	140 мм / 2,7 року	140 мм / 4,1 року	100 мм / 3,0 року
3600	140 мм / 2,5 року	140 мм / 3,9 року	100 мм / 2,8 року
3800	160 мм / 2,4 року	140 мм / 3,7 року	120 мм / 2,7 року
4000	160 мм / 2,3 року	160 мм / 3,5 року	120 мм / 2,5 року

що дозволить моделювати в динамічному режимі енергетичні баланси технічних комплексів «будівля-система теплозабезпечення» різного призначення із врахуванням: кліматичних характеристик території розташування будинку, індивідуальних конструктивних особливостей кожного шару зовнішніх стін; теплотехнічних властивостей будівельних матеріалів та утеплювачів; технологічних параметрів наявної

системи опалення; актуальних цін та тарифів на енергоносії, будівельні матеріали та послуги. Результати досліджень можуть застосовувати власники приватних будинків, проєктувальники та підрядники житлової забудови, які мають намір утеплити зовнішні стіни будинку та обґрунтувати витрати, визначити оптимальну товщину утеплювача та термін окупності за фактичних умов експлуатації.

## Література

1. Ascione F., Bianco N., De Masi R., Mauro G. M., Vanoli G. P. Design of the Building Envelope: A Novel Multi-Objective Approach for the Optimization of Energy Performance and Thermal Comfort. *Sustainability*. 2015, № 7(8), 10809-10836. DOI: <https://doi.org/10.3390/su70810809>.
2. Verichev K., Serrano-Jiménez A., Carpio M., Barrios-Padura Á., Díaz-López C. Influence of degree days calculation methods on the optimum thermal insulation thickness in life-cycle cost analysis for building envelopes in Mediterranean and Semi-Arid climates. *Journal of Building Engineering*. 2023, Vol. 79, 107783, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107783>.
3. Hao Z., Zhang X., Xie J., Yin K., Liu J., Balance point temperature and heating degree-days in different climate conditions for building energy efficiency applications. *Building and Environment*. 2022, Vol. 214, 108957. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109013>.
4. Ukey R., Rai A.C. Impact of global warming on heating and cooling degree days in major Indian cities. *Energy and Buildings*, 2021. Vol. 244, 111050. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111050>.
5. Verichev K., Zamorano M., Fuentes-Sepúlveda A., Cárdenas N., Carpio M. Adaptation and mitigation to climate change of envelope wall thermal insulation of residential buildings in a temperate oceanic climate. *Energy and Buildings*. 2021, Vol. 235. 110717, Mar., doi: [10.1016/j.enbuild.2020.110717](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110717).
6. Canbolat A.S. An integrated assessment of the financial and environmental impacts of exterior building insulation application. *Journal of Cleaner Production*. 2024, Vol. 435, 140376, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140376>.
7. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія. Мінрегіонбуд України. Київ: Укрархбудінформ, 2011. 123 с.
8. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. Київ: Мінрегіон, 2021. 74 с.
9. ДСТУ 9191:2022. Теплоізоляція будівель. Метод вибору теплоізоляційного матеріалу. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022. 108 с.
10. Ціни на утеплення мінватою на 2026 рік. URL: <https://domremonta.com.ua/uk/uteplenie-minvatoj/#czeny-na-uteplenie-minvatoj> (дата звернення: 27.01.2026).
11. ТеплоКомфорт. URL: <https://teplokomfort.kiev.ua/ua/прайс/утеплення-будинків-та-квартир> (дата звернення: 27.01.2026).
12. Ціна утеплення фасадів пінопластом і мінватою, Київ. URL: <https://kliner.com.ua/ua/tsiny-na-uteplennja-fasadiv/> (дата звернення: 27.01.2026).
13. Стандарт-фасад. Вартість утеплення. URL: <https://fassad.kh.ua/price-ua.html> (дата звернення: 27.01.2026).
14. Утеплення фасаду Харків. URL: <https://teplo-tex-stroi.com/uteplennya/uteplennya-fasadu/uteplennya-fasadu-kharkov> (дата звернення: 27.01.2026).
15. Атлант. Утеплювачі та ізоляційні матеріали. URL: <https://atlant-shop.com.ua/uk/pokrivlya-uteplennya-fasad/uteplyuvachi-ta-izolyatsiyni-materiali> (дата звернення: 27.01.2026).
16. Новаторбуд. Утеплювачі та ізоляція. URL: <https://novatorstroy.com.ua/category/utepliteli-i-izolyatsiya/> (дата звернення: 27.01.2026).
17. Робітники. Теплоізоляція. URL: <https://www.rabotniki.ua/uk/teploizolyatsiya> (дата звернення: 27.01.2026).
18. Зубр. Утеплення фасаду в Харкові. <https://zubr.kh.ua/fasadnye-raboty/uteplenie-fasada/> (дата звернення: 27.01.2026).
19. Кабанчик. Утеплення фасадів в Києві. URL: <https://kabanчик.ua/ua/kyiv/category/uteplennia-fasadiv/> (дата звернення: 27.01.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 12.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026

## ПЕРЕВАГИ МАТРИЧНОГО МЕТОДУ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛУРГІЙНИХ ВІДХОДІВ У БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ СУМІШАХ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА МЕТАЛУРГІЙНИХ БРИКЕТІВ

Волошин В.С.

Приазовський державний технічний університет  
вул. Гоголя, 29, 49044, м. Дніпро  
vsvlshn52@gmail.com

В роботі розглянуто переваги методики прогнозування властивостей та створення багатокомпонентних сумішей з числа основних металургійних відходів, для вторинного використання в металургічних процесах, за допомогою моделей багатовимірних матриць суміжності і клітинних даних про термодинамічні показники таких сумішей. Надано аналіз переваг та недоліків низці теоретичних та експериментальних досліджень, які підтверджують ефективність запропонованої методики. У додаток до існуючої методики запропонований механізм Бассової аналітики, який надає можливостей отримання фізично обґрунтованих знань про властивості таких систем за рахунок поєднання фізичних та статистичних закономірностей, забезпечення аналітичної мультиоб'єктивності, урахування структурних кореляцій на рівні спектральних ознак ентропійної матриці, а також за рахунок цього дозволяє виявляти вплив міжкомпонентних кореляцій на кінцеву функцію  $f(x) = Q$ , що унеможливується при простих ознаках. Показано, що існуючі в зарубіжній науковій літературі дані по оптимальним сумішам, що отримують з металургійних відходів, можуть мати поліпшені варіанти, за рахунок підвищення рангу аналізованої матриці суміжності та розширеного спектру можливих сумішей. Показано, що запропонований метод є потужним, теоретично обґрунтованим і практично перспективним інструментарієм для оптимізації багатокомпонентних сумішей щодо отримання металургійних брикетів. За умови точного отримання вхідних даних ентропії, розумного стиснення параметрів (низькорангові представлення), параметризації температури та інтеграції з експериментальним дизайном, метод пропонує значні переваги над «чисто емпіричним» підходом: зменшення кількості експериментів, підвищення відтворюваності, кількісне інтерпретування взаємодій і можливість багатокритеріальної оптимізації. Накопичений досвід впровадження методики свідчить, що її, в різних модифікаціях і в залежності від встановлених цілей та завдань, можна ефективно використовувати як попереднє дослідження для подальших об'єктивних багатофакторних експериментів і завдань, де кожен тест є дорогим і трудомістким. *Ключові слова:* металургійні відходи, матриця суміжності, Бассівські мережі, металургійні суміші, брикети, оптимальні системи, термодинамічні показники.

### Advantages of the matrix method of studying the properties of metallurgical waste in multicomponent mixtures for the production of metallurgical briquettes. Voloshyn V.

This work examines the advantages of a methodology for predicting the properties and designing multicomponent mixtures derived from major metallurgical residues for their secondary use in metallurgical processes. The approach is based on multidimensional adjacency-matrix models and cell-level thermodynamic data describing the behaviour of such mixtures. An analysis is provided of the benefits and limitations of a number of theoretical and experimental studies that confirm the effectiveness of the proposed methodology. As an extension of the existing framework, a Bayesian analytics mechanism is proposed. This mechanism enables the extraction of physically justified knowledge regarding the properties of these systems by combining physical and statistical regularities, ensuring analytical multi-objectivity, incorporating structural correlations at the level of spectral features of the entropy matrix, and, consequently, revealing the influence of intercomponent correlations on the final objective function  $f(x)=Q$ , which cannot be detected using simple features. It is shown that the existing results in the international scientific literature regarding optimal mixtures obtained from metallurgical waste may be further improved by increasing the rank of the analysed adjacency matrix and by expanding the spectrum of potential mixture configurations. The analysis demonstrates that the proposed method is a powerful, theoretically grounded, and practically promising tool for optimizing multicomponent mixtures intended for the production of metallurgical briquettes. Provided that input entropy data are obtained with sufficient accuracy, along with appropriate parameter compression (low-rank representations), temperature parameterization, and integration with experimental design, the method offers substantial advantages over a “purely empirical” approach: a reduced number of experiments, improved reproducibility, quantitative interpretability of interactions, and the possibility of multi-criteria optimization. Accumulated experience with the implementation of the methodology indicates that, in its various modifications and depending on the defined goals and tasks, it can be effectively used as a preliminary analytical stage prior to objective multifactor experiments and tasks in which each individual test is costly and labour-intensive. *Key words:* metallurgical waste, adjacency matrix, Bayesian networks, metallurgical mixtures, briquettes, optimal systems, thermodynamic indicators



**Постановка проблеми.** Проблеми мінімізації промислових відходів, незважаючи на їхню актуальність і величезну кількість методів і способів досягнення, залишаються невирішеними і потребують додаткових підходів та теоретичного обґрунтування.

**Актуальність дослідження.** В умовах, когда металлургические отходы занимают большие земельные ареалы на планете и постоянно увеличиваются в объемах, проблема их переработки, приведения к состоянию товарной продукции в любых доступных проявлениях, является одной из актуальных задач для прикладных наук в области техники защиты окружающей среды.

**Зв'язок авторського доробку із важливими науковими і практичними завданнями.** Підсумки Базельської конвенції 2024 та World Circular Economy Forum-2024 в Брюсселі надають нові шляхи в напрямку переробки принципово нових сучасних промислових відходів, сприяли впровадженню циклічних моделей економіки і пошуку нових методів управління відходами, що є темою цих досліджень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Протягом останніх років група авторів розробила та на практичних експериментах підтвердила ефективність методики прогнозування властивостей багатокомпонентних сумішей за допомогою моделей багатовимірних матриць суміжності [1]. На цей час методика випробувана в технологіях отримання металургійних брикетів, виробництві геополімерів [2], виробництві хліба [3], дорожньому будівництві, тобто там, де похідними результатами повинні бути багатокомпонентні суміші. Джерелом такої переваги є простота та очевидність методики, універсальність термодинамічних показників, що надають можливостей для уніфікованого розгляду явно неспівставних показників якості кінцевої продукції. В сучасній літературі надаються експериментальні дані щодо пошуку оптимальних співвідношень вихідних компонентів – металургійних відходів у підсумковій суміші [4, 5, 6].

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Розроблені методи вирішення питання про створення ефективних металургійних сумішей для отримання металургійних брикетів мали знайти своє підтвердження, в порівнянні з існуючими в літературі та на практиці, варіантами за об'єктивними інтегральними критеріями ефективності.

**Новизна.** Розроблена математична модель багатовимірних матриць для аналізу та прогнозування необхідних властивостей для багатокомпонентних металургійних сумішей, має розвиток в сторону евристичних та статистичних методів, що суттєво уточнюють методологію аналізу.

**Методологічне або загально-наукове значення.** Методологія аналізу несумісних по показникам складних систем за допомогою багатовимірних

матриць суміжності має більш широке значення для багатьох виробництв, які мають справу з компонентними сумішами.

**Викладення основного матеріалу.** Коротко представимо метод оцінки якості сумішей для виробництва металургійних брикетів за допомогою багатовимірних матриць суміжності [1]. Багатокомпонентна суміш  $b_{p,q,r,t}$  ( $p = 1,1,P; q = 1,1,Q; r = 1,1,R; t = 1,1,T; p \neq Q \neq R \neq T$ ) подається як набір початкових  $b_i$  компонентів із обраної для аналізу лінійки металургійних відходів, на основі яких будується багатовимірна матриця (тензор) суміжності, у клітинах якої на перетині певних наборів компонентів фіксуються оцінки ентропії цієї суміші або змінення ентропії під час переходу від окремих компонентів до їхньої суміші. Загальна (комплексна) ентропія суміші інтерпретується як сума кількох типів ентропії (конфігураційна, хімічна, сумішна, вібраційна та конструктивна, тощо), кожна з яких показує свій внесок у фінальний індикатор. Сумарна ентропія системи розраховується як

$$S_{p,(q,r,t,\dots)total} = \sum x_{p,(q,r,t,\dots)} S_{p,(q,r,t,\dots)}^{comp} + (\Delta S_{mix} + S_{surf} + S_{conf} + S_{chem} + S_{proc})_{p,(q,r,t,\dots)} \quad (1)$$

де:  $x_{p,(q,r,t,\dots)}$  – кількісна частка  $p, (q, r, t, \dots)$ -го компонента;  $S_{p,(q,r,t,\dots)}^{comp}$  – питома (по молярній масі) ентропія чистого компонента системи при заданих норм. умовах (термодинамічна, як внесок внутрішніх ступенів свободи);  $\Delta S_{mix}$  – зміна ентропії об'єднання компонентів (ідеал + надлишок);  $S_{surf}$  – внесок ступенів свободи на взаємодіючих поверхнях розділу компонентів (залежить від конкретної поверхні, зв'язаних і вільних компонентів);  $S_{conf}$  – конфігураційна ентропія взаємного розташування компонентів (структурна неоднорідність, щільність упаковки окремих компонентів) в системі;  $S_{chem}$  – ентропійні зміни, пов'язані з хімічними реакціями взаємодії між окремими компонентами системи (розкладання, окислення, відновлення, утворення нових фаз);  $S_{proc}$  – процес-кінетичний внесок до системи у вигляді нерівноважних ефектів при деформації, температурній дії (включаючи «похідні ентропії» від розподілу швидкості зміни температури) відносно окремих компонентів системи. Можливі й інші, не менш актуальні складові повної ентропії в залежності від змісту отриманої системи.

Багатовимірною матрицею суміжності має загальний вигляд  $P \times Q \times R \times T \times \dots$ , где  $P = Q = R = T = \dots$ . Кожна клітинка матриці суміжності має вигляд  $b_{p,q,r,t,\dots}$  где  $p=1,1,P; q=1,1,Q; r=1,1,R; t=1,1,T; \dots$ . Для кожної такої клітинки матриці надається розрахункове значення ентропії у вигляді виразу

$$S_{(p,q,r,t,\dots)total} = \sum_{i=1}^N S_{(p,q,r,t,\dots)i}, \text{ де кожна } i\text{-а складова є незалежною друг від друга та приймає значення від } S_{(p,q,r,t,\dots)i}^{min} \text{ до } S_{(p,q,r,t,\dots)i}^{max}.$$

У першій частині задачі на оптимізацію суміші необхідно знайти рішення, яке дозволить визначити клітинку  $b_{p,q,r,t,\dots}^*$  для якої була б виконана умова: один із членів ентропії  $S_{(p,q,r,t,\dots);i}$  цієї клітинки ( $i$  – аскадова), буде найменшим за термодинамічними показниками серед тих самих членів інших клітинок заданої матриці суміжності, щоб визначити координати цієї клітинки та показати для неї значення  $S_{(p,q,r,t,\dots);i}$

Другу частину задачі потрібно розв’язати так, що один із компонентів ентропії  $S_{(p,q,r,t,\dots);i}$  ( $i$  – аскадова) для клітинки  $b_{p,q,r,t,\dots}^{**}$  буде найбільшим серед тих самих компонентів інших клітин заданої суміжної матриці за обраним термодинамічним показником.

Множина всіх мінімізуючих індексів визначається як

$$M_i^{min} = \arg \min_{\alpha \in \mathcal{J}} S_{\alpha}^i = \left\{ \alpha \in \mathcal{J} \mid S_{\alpha}^i = \min_{\beta \in \mathcal{J}} S_{\beta}^i \right\}. \quad (2)$$

І множина усіх максимізуючих індексів

$$M_i^{max} = \arg \max_{\alpha \in \mathcal{J}} S_{\alpha}^i = \left\{ \alpha \in \mathcal{J} \mid S_{\alpha}^i = \max_{\beta \in \mathcal{J}} S_{\beta}^i \right\}. \quad (3)$$

Показником ефективності таких систем в їх термодинамічних обмірах пропонується агрегований індекс якості  $f(x) = Q [0 \div 1]$

$$Q = \lambda_1 I_{mix} + \lambda_2 I_{dens} + \lambda_3 I_{hom}, \quad (4)$$

де вагові коефіцієнти  $\lambda_i$  складаються до 1, експериментально або експертно. Тут  $I_{dens}$  – потенціал міцності, щільність обернено залежна від небажаних внесків ентропії;  $I_{mix}$  – позитивна роль ідеальної ентропії змішування  $\Delta S_{mix,ideal}$  (чим вище, тим краще хімічна однорідність та можливість реакції) нормалізується до максимально можливої для даного числа компонентів;  $I_{hom}$  – показник однорідності суміші за хімічним складом і фракціонуванню.

Така формалізована модель використовується для ранжування та вибору можливих формулювань сумішей перед експериментом. Анотація моделі може розглядатися як явна формула для інтерпретації та подальшої роботи наступного змісту.

Позначимо масові (або молярні) частки кожного з компонентів  $b_p$  як  $x_p$ . Тоді ми можемо представити, наприклад, зміну ентропії суміші як термодинамічне розширення, що складається з комірок послідовних двох- трьох- та чотирьохвимірних матриць суміжності:

$$\Delta S_{mix}(x) = \sum x_p S_p^0 + \sum_{p < q} x_p x_q \Delta S_{p,q} + \sum_{p < q < r} x_p x_q x_r \Delta S_{p,q,r} + \dots \quad (5)$$

де  $S_p^0$  – вклад чистого  $b_p$  –го компонента (питома ентропія),  $\Delta S_{p,q}$  – парний внесок (записується в матриці суміжності),  $\Delta S_{p,q,r}$  – потрійний внесок (клітинки 3-вимірного тензору) и т.д. На практиці можливо обмежити члени матриці порядком  $p, q, r, t$ , тобто чотирикомпонентними сумішами, якщо вищі сили не ідентифікуються за даними.

Подальші обчислювальні та статистичні методи для вдосконалення моделі можуть дозволити розширити її можливості за ради отримання оптимальних за якістю металургійних сумішей. Зокрема, алгоритм системи «CALPHAD (CALculation of PHase Diagrams) + ентропійні багатовимірні матриці суміжності + Баєсівська оптимізація» для ефективно оцінки й оптимізації багатоконпонентних сумішей (металургійні відходи → суміші → брикети) означає поєднання фізико-термодинамічного моделювання (CALPHAD) для обчислення енергетичних та ентропійних характеристик композицій металургійних відходів, представлення їх характеристик у вигляді чисельних ознак (включно з властивостями ентропійної багатовимірної матриці суміжності, дозволяє мінімізувати кількість дорогих експериментів для знаходження композицій підсумкових сумішей з оптимальними термодинамічними показниками.

Позначимо:  $x \in \mathcal{X} \subset \mathbb{R}^d$  – вектор параметрів складу суміші (долі вихідних компонентів з числа металургійних відходів (можливо додаткові параметри: температура плавлення, розмір частинок тощо);  $f(x)$  – цільова функція якості суміші, яку ми хочемо мінімізувати/максимізувати; в нашому випадку це функція від термодинамічних показників (наприклад, комбінований скаляр):

$$f(x) = w_1 \cdot S_{mix}(x) + w_2 \cdot \Delta S(x) + w_3 \cdot \Phi_{phases}(x) + \dots \quad (6)$$

де  $S_{mix}(x)$  – змішувальна (конфігураційна) ентропія,  $\Delta S$  – зміна ентропії при процесі брикетування/плавленні,  $\Phi_{phases}(x)$  – штрафи за небажані фази ( $\sigma$ , інтерметаліди) через CALPHAD;  $w_i$  – ваги, що задаються експертом або автоматично нормуються.

Баєсівська аналітика надає можливостей отримання фізично обґрунтованих знань за рахунок поєднання фізичних та статистичних закономірностей, забезпечення аналітичної мультиоб’єктивності (оптимізація по декільком критеріям), урахування структурних кореляцій на рівні спектральних ознак ентропійної матриці дозволяють виявляти вплив міжкомпонентних кореляцій на кінцеву функцію  $f(x)$ , що унеможливується при простих ознаках.

Варіанти потенційних розширень математичної моделі багатовимірних суміжних матриць для подальших досліджень властивостей багатоконпонентних сумішей з металургійних відходів включають пропонувану формулу цільової функції (скалярний варіант)

$$f(x) = \alpha_1 \underbrace{\frac{S_{mix}(x) - S_{mix}^{opt}}{S_{scale}}}_{\text{ентропійна відстань}} + \alpha_2 \underbrace{\|\{\text{небажані фази}\}}_{\text{штраф за фази}} + \alpha_3 \underbrace{\frac{\Delta G_{liquid-solidus}(x)}{G_{scale}}}_{\text{термодин. стабільність}} + \alpha_4 Cost(x) \quad (7)$$

Тут  $\alpha_i$  – нормовані ваги. Індикатор  $\|\cdot\|$  можна зробити м’яким (penalty continuous) через величину вмісту фази.

Ідея використання такої моделі науково обґрунтована і вельми корисна, оскільки вона відображає природу багатofакторних взаємодій у багатofакторних системах з заздалегідь неспівставними параметрами. У металургійних сумішах властивості брикету (міцність, пористість, реактивність, плавна поведінка) часто визначаються не сумою властивостей окремих компонентів, а їхніми взаємодіями (парними та вищих порядків). Індикатори ентропії в матричній моделі точно кодують статистичний і структурний бік таких взаємодій. Загалом, наступні характеристики моделі помітні.

1. Запропонована математична модель дозволяє формалізувати різні властивості багатofакторних систем, включаючи їхні нелінійні ефекти, за допомогою уніфікованих термодинамічних індикаторів, які однозначно інтерпретують властивості таких систем. Запис парних, потрійних і чотирьохкомпонентних членів у матриці (тензорі) еквівалентний урахуванню взаємних кореляцій і синергій (або можливих антагонізмів), які неможливо адекватно виконати «наочно» шляхом емпіричного відбору або внаслідок дорогого експерименту.

2. Ця методика дозволяє суттєво зменшити обсяг дорогих експериментів. За наявності правильної моделі та достатньої кількості вхідних даних можна відкинути очевидно «погані» розкладки і зосередитися на перспективних областях композиційного простору.

3. Забезпечує відтворюваність і портативність знань через нормальну матрицю (тензор), яка є машинозчитуваним записом взаємодій; її можна зберігати, передавати, комбінувати з іншими наборами даних – на відміну від розсіяного емпіричного досвіду.

4. Дозволяє інтегрувати додаткові вимірювані величини. Не лише «сира» ентропія може бути вбудована в клітини суміжної матриці, а й інші пов'язані метрики (ентропія дефектної структури, ентропія пористості, зміни вільної енергії тощо), що робить запропонований метод гнучким.

Очевидними є переваги цього методу порівняно з суто емпіричним вибором варіантів суміші, а саме.

1. Ефективність пошуку та експоненціальне зменшення тестового простору. Емпіричний відбір включає тести великої кількості комбінацій; фільтрація моделей автоматично видаляє пошкоджені ділянки заздалегідь.

2. Організація цілеспрямованих експериментів. Здатність використовувати алгоритми оптимізації (басівська оптимізація, еволюційні алгоритми) для вибору конкретних композицій, що є ефективнішим, ніж «сліпі» перегорodka.

3. Надійність і відтворюваність, менше суб'єктивності. Емпіризм значною мірою залежить від місцевого досвіду; Матриця ентропії суміжності є прозорим формалізмом.

4. Обґрунтованість рішень. Відбір можна аргументувати чисельно та уніфіковано (внесок у ентропію, чутливість, передбачувані компроміси).

5. Багатофункціональний характер. Функціональний мультиоб'єкт дозволяє одночасно мінімізувати або максимізувати (залежно від завдання) різні індикатори (міцність, реактивність, кут плавлення, кількість летких речовин тощо), формалізуючи їх як функції одних і тих самих матриць (тензорів) суміжності.

6. Здатність враховувати фізичні та хімічні обмеження, наприклад, термостатичну консистенцію. Модель може включати обмеження, що впливають із CALPHAD через закони збереження, а також фізичні обмеження (наприклад, дозволена пористість, частка летких речовин).

І наприкінці цієї частини дослідження надаймо підсумкову таблицю порівнянь переваг запропонованої математичної моделі.

Як аргументацію на користь працездатності та ефективності запропонованих моделей прогнозування оптимальних за складами багатofакторних сумішей з металургійних відходів наведемо порів-

Таблиця 1

**Показники для співставлення вибірних аспектів багатofакторних сумішей розрахунковим та експериментальним методами**

Аспект	Математична модель багатofакторних матриць суміжності	Кількість емпіричних або експериментальних варіантів суміші
Охоплення простору композицій	Широкий під час моделювання; інтерактивний	Обмежений практичними тестами
Швидкість пошуку	Швидше за коректними даними (збереження експериментів)	Повільніше, «крок за кроком»
Інтерпретованість	Висока (числові внески)	Низька – досвід, інтуїція
Врахування нелінійних взаємодій	Прямий і формальний	Важко отримати, потрібен великий досвід
Масштабованість	Підтримується математично	Обмежена ресурсами
Ризик статистичної похибки	Потрібна точна оцінка параметрів	Ризик прихованих упереджень із досвіду

няні результати відносно використання запропонованої методики щодо існуючих в науковій літературі варіантів у співставленні з розрахунковими. Вихідні дані для такого співставлення надані в таблиці 2.

Наведемо експериментальні суміші, що обрані для співставлення та їх термодинамічні характеристики:

– суміш  $b_{6,11,9} = b_6 + b_{11} + b_9$  (зсушений шлам НВІ + висіяна дрібність НВІ + відсів окатишів) та співвідношенням компонентів (60% + 10% + 30%) [6]. Інтегральна ефективність суміші  $Q=0,45$  од.

– суміш  $b_{7,3,1} = b_7 + b_3 + b_1$  (окалина металургійна + пил після очистки доменних газів + бентоніт) (80% + 18% + 1.5%) [5]. Інтегральна ефективність цієї суміші  $Q=0,67$ .

– суміш із формулою  $b_{4,1,12} = b_4 + b_1 + b_{12}$  (шлам конвертерний + відновлювач + бентоніт) (73%+25%+2%) [5]. Інтегральна ефективність цієї суміші  $Q=0,311$ .

– суміш з формулою  $b_{2,7,1} = b_2 + b_7 + b_1$  і процентним відношенням компонентів (43%+55%+2%) [4]. Інтегральна ефективність  $Q=0,455$

Альтернативні суміші, отримані за допомогою запропонованої моделі мають сукупні показники, що зведені в таблицю 3. На виході моделі отримуємо розрахункові результати у вигляді найбільш

привабливих сумішей з обраною лінійкою металургійних відходів, без визначення порядку та проміжних результатів такого аналізу. Звертаємо увагу на значну більшість розрахункових варіантів сумішей для технологій брикетування, що отримані як оптимальні, в співставленні з експериментальними даними. Ми будемо порівнювати експериментальні та розрахункові суміші по кінцевому показнику  $f(x) = Q$  – інтегральної ефективності системи.

На основі аналізу багатокомпонентних сумішей, призначених для виробництва металургійних брикетів, сформулюємо узагальнені результати, які характеризують їх термодинамічну, технологічну та структурну застосовність.

1. Суміш  $b_{2,6,9,12}$  демонструє найвищу термодинамічну та технологічну ефективність. Її структура поєднує активний відновник (вуглецевий компонент), високоенергетичний гарячий брикетований залізний осад (НВІ) та стабільні гранулярні фази, що забезпечують стабільність і високу реактивність під час термічної обробки.

2. Суміші  $b_{6,11,12}$  та  $b_{2,7,9,10}$  характеризуються оптимальним співвідношенням між відновлювальними та плавильними властивостями. Ця комбінація компонентів утворює збалансовані термодинамічні

Таблиця 2

**Хімічний склад лінійки металургійних відходів і зв'язуючих речовин, що розглядаються для отримання брикетів певної властивості**

$b_p$	Тип відходу	Основні компон.	$Fe_{>11}$ %	Zn, %	C, %	CaO %	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Ентропія, Дж/(мольК)
$b_1$	Бентоніт	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaO, SiO <sub>2</sub>	1-3	-	<0.5	1-4	55-65	15-20	344
$b_2$	Шлам доменної печі	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , CaO, SiO <sub>2</sub> , C	40-55	0.5	15-25	3-4	4-7	2-3	138
$b_3$	Пил від очистки доменних газів	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , C, CaO	25-35	0.5-2	30-40	5-10	10-20	2-3	121
$b_4$	Шлам конвертерний	FeO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaO, ZnO	45-55	2-5	1-3	10-15	6-8	<1	116
$b_5$	Пил від електродугової печі	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ZnO, PbO, CaO	30-40	10-25	2-4	5-10	5-8		95,1-105
$b_6$	Зсушений шлам НВІ*	Fe (мет.), FeO, C	70-75	<0.1	2-3	1-3	2-4	<1	77,5
$b_7$	Окалина металургійна	FeO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe (мет.)	65-75	<0.1	-	7-8	2-3	3-4	70,4-72,4
$b_8$	Класифікаційний пил	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , SiO <sub>2</sub> , C	65-75	-	<0.3	1-2	3-4	1-2	41,2
$b_9$	Відсів окатишів	FeO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , CaO	60-70	-	<0.3	1-2	2-3	<0.6	39,0
$b_{10}$	Ремет-частинки	Fe (мет.), FeO, Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	80-90	-	<0.5	1-2	<1	<1	35,0
$b_{11}$	Висіяна дрібність НВІ	Fe (мет.), FeO	70-80	-	1-2	1-2	1-2	<0.6	28,8
$b_{12}$	Відновлювач	C (аморфн., фиксов.)	-	-	70-85	2-5	2-4		3,4

\*- гаряче брикетоване залізо

Таблиця 3

Підсумкові дані щодо ранжування оптимальних складів сумішей для виробництва металургійних брикетів за областями їх технологічного призначення.

Технологічне призначення брикетів	Кількість сумішей що застосовується	Середній Е	Кращі суміші за напрямком використання
Відновлення (R)	7	2,1	$b_{2,6,9,12}, b_{6,11,12}$
Плавлення (M)	7	2,0	$b_{2,7,9,10}, b_{3,5,9,10}$
Агломерація (A)	7	2,0	$b_{1,2,7,11}$
Флюкс (F)	6	1,9	$b_{4,7}, b_{4,5,7}$
<b>Підсумкове ранжування кращих сумішей</b>			
Мітка суміші	Інтегральна ефективність, Q, од.	Пріоритетне призначення Суміші	
$b_{2,6,9,12}$	8,5	Відновлення та плавлення	
$b_{6,11,12}$	7,2	Редукційно-структурна	
$b_{2,7,9,10}$	6,6	Плавильно-відновлювальна	
$b_{2,7,12}$	6,1	Редукційна	
$b_{2,8,10,12}$	6,0	Універсальна з високим $\diamond S$	
$b_{3,5,9,10}$	6,2	Плавильно-редукційна	
$b_{6,9,10,11}$	5,4	Комплексна до агломерації	
$b_{4,1,12}$	5,4	Відновлювально-агломераційна	
$b_{2,7,10}$	4,7	Плавильна проміжкова	
$b_{1,2,7,11}$	4,3	Агломераційна	

профілі, які забезпечують ефективний хід реакцій відновлення при збереженні достатньої плинності шлакової фази.

3. Агломераційні суміші ( $b_{1,2,7,11}$  та  $b_{6,11,1}$ ) мають знижений енергетичний потенціал, але демонструють високу структурну стабільність. Це робить їх доречними для виробництва брикетів, спрямованих на формування міцної та термостійкої матриці, особливо в процесах попереднього ущільнення та агломерації дрібних відходів.

4. Флюксуючі комбінації ( $b_{4,7}$  і  $b_{4,5,7}$ ) мають мінімальні енергетичні характеристики, але відіграють ключову роль у утворенні шлаку та корекції хімічного складу системи. Їх використання стабілізує фазову рівновагу та регулює кислотно-лужні властивості кінцевого продукту.

**Висновок.** Запропонований метод є потужним, теоретично обґрунтованим і практично перспектив-

ним інструментарієм для оптимізації багатокомпонентних сумішей щодо отримання металургійних брикетів. За умови точного отримання вхідних даних ентропії, розумного стиснення параметрів (низькорангові представлення), параметризації температури та інтеграції з експериментальним дизайном, метод пропонує значні переваги над «чисто емпіричним» підходом: зменшення кількості експериментів, підвищення відтворюваності, кількісне інтерпретування взаємодій і можливість багатокритерійної оптимізації. Можливі недоліки – це низькі показники взаємодії та стрибкообразні зміни параметрів, які можна компенсувати за допомогою регуляризації, DoE та активної генерації даних. Цю методику можна ефективно використовувати як попереднє дослідження для подальших об'єктивних багатфакторних експериментів і завдань, де кожен тест є дорогим і дорогим.

### Література

1. Волошин В. С., Ткаленко І. Методика оцінки взаємодії металургійних відходів при їх рециклінгу. Вчені записки Таврійського університету ім. В. І. Вернадського. Т.36(75), № 4, Ч.1, 2025. С. 191-199.
2. Волошин В. С. Використання металургійних відходів для виробництва геополімерів. Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення. Зб. наук. статей. УкрНДІЕП, Харків, 2025. С. 109-116.
3. Волошин В. С., Бурко В. А. Термодинамічний підхід та використання резонансної енергії для мінімізації відходів у харчовій промисловості. ВІСНИК ХНТУ № 2(93), Інженерні науки. Ч. 1, 2025 р. 25-32с.
4. Tkachenko I, Kovtun O., Koriuchev N., Platonov L., Shehovsov D. Recovery of Zn from Auger Press Briquettes Made from Steelmaking Sludge. European Journal of Engineering and Technology Research Vol 8 2023. P.73-91.

5. Vitikka O., M. Pijana M., Heikkilä F., Tkalenko I., Kovtun J., Koriuchev N., Shehovsov D., Fabritius T. Effect of Biocarbon Addition on Metallurgical Properties of Mill Scale-Based Auger Pressing Briquettes. *ISIJ International*. The Iron and Steel Institute of Japan; Vol. 64, No. 6, 2024. – P. 964–977.
6. Lohmeier L., Thaler C., Harris C., Wollenberg R., Schröder H.-W. Briquetting of Fine-Grained Residues from Iron and Steel Production Using Organic and Inorganic Binders, *Steel Research International (Wiley-VCH)*, 2020. – P. 1–10.

Дата першого надходження статті до видання: 05.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026

## КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ РОЗВИТКУ ЕКОЛОГІЧНО ОРІЄНТОВАНОГО ПІДПРИЄМНИЦТВА В УМОВАХ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ

Літвак О.А., Гура О.О.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова  
пр. Героїв України, 9, 54007, м. Миколаїв  
[olya.litvak@gmail.com](mailto:olya.litvak@gmail.com); [oleksandr.hura@nuos.edu.ua](mailto:oleksandr.hura@nuos.edu.ua)

У статті узагальнено основні напрями цифрової трансформації підприємництва та окреслено пов'язані з ними екологічні ефекти. Методологічну основу дослідження становлять аналіз і систематизація наукових джерел, узагальнення сучасних практик цифровізації, а також концептуальне моделювання взаємозв'язків між цифровими рішеннями, управлінськими механізмами та екологічними цілями підприємницької діяльності. Запропоновано підхід до оцінювання результативності цифрово-екологічних рішень на основі системи ключових показників, що дозволяє відстежувати зміни у споживанні енергії й води, утворенні відходів, викидах, а також у показниках управлінської результативності (оперативність, керованість, підзвітність). Розроблено концептуальну модель розвитку екологічно орієнтованого підприємництва в умовах цифрової трансформації, яка розглядає підприємництво як відкриту соціально-економічну систему, розвиток якої визначається взаємодією технологічних, управлінських, екологічних та інституційних чинників. У межах такого підходу цифрові технології інтерпретуються не лише як інструменти підвищення оперативної ефективності, а як системний фактор, що трансформує підприємницькі процеси, логіку прийняття рішень і механізми забезпечення екологічної відповідальності. У моделі окреслено очікувані результати впровадження у трьох взаємопов'язаних групах ефектів (екологічних, економічних і соціально-управлінських) та передбачено зворотний зв'язок на основі даних моніторингу й оцінювання ключових показників, що забезпечує коригування управлінських рішень і удосконалення підприємницьких процесів відповідно до екологічних вимог та цифрових можливостей. Перевагою моделі є її універсальність і можливість адаптації до різних видів та форм підприємництва шляхом уточнення набору цифрових інструментів, регуляторних вимог і системи показників результативності. Зазначено, що впровадження моделі потребує врахування типових фінансових, кадрових, організаційних, технологічних та інституційних бар'єрів. Підкреслено прикладну цінність запропонованих положень, що полягає у можливості структуровано обирати цифрові рішення, пов'язувати їх з екологічними пріоритетами та забезпечувати вимірюваність досягнутих результатів на основі системи ключових показників. **Ключові слова:** екологічно орієнтоване підприємництво, цифрова трансформація, ключові показники, ресурсоефективність, екологічний ефект, концептуальна модель, управлінські рішення, прозорість,

### Conceptual model for the development of environmentally oriented entrepreneurship under conditions of digital transformation. Litvak O., Hura O.

The article synthesizes the main directions of the digital transformation of entrepreneurship and outlines the environmental effects associated with them. The methodological framework of the study is based on the analysis and systematization of scholarly sources, the generalization of contemporary digitalization practices, and conceptual modelling of the relationships between digital solutions, managerial mechanisms, and the environmental goals of entrepreneurial activity. An approach to assessing the performance of digital-environmental solutions is proposed on the basis of a system of key indicators, which makes it possible to track changes in energy and water consumption, waste generation, emissions, as well as managerial performance indicators (responsiveness, controllability, accountability). A conceptual model for the development of environmentally oriented entrepreneurship under conditions of digital transformation is developed; it treats entrepreneurship as an open socio-economic system whose development is determined by the interaction of technological, managerial, environmental, and institutional factors. Within this perspective, digital technologies are interpreted not only as tools for improving operational efficiency, but also as a systemic factor that transforms entrepreneurial processes, the logic of decision-making, and the mechanisms for ensuring environmental responsibility. The model specifies the expected implementation outcomes in three interrelated groups of effects (environmental, economic, and socio-managerial) and incorporates a feedback loop based on monitoring data and the evaluation of key indicators, which ensures the adjustment of managerial decisions and the continuous improvement of entrepreneurial processes in accordance with environmental requirements and digital capabilities. An advantage of the model is its universality and the possibility of adaptation to different types and forms of entrepreneurship by refining the set of digital tools, regulatory requirements, and the system of performance indicators. It is noted that model implementation requires consideration of typical financial, human-capital, organizational, technological, and institutional barriers. The applied value of the proposed provisions lies in enabling a structured selection of digital solutions, linking them to environmental priorities, and ensuring the measurability of achieved results on the basis of a system of key indicators. **Key words:** environmentally oriented entrepreneurship, digital transformation, key indicators, resource efficiency, environmental effect, conceptual model, managerial decisions, transparency.



**Постановка проблеми.** У сучасних умовах розвитку економіки цифрова трансформація виступає одним із ключових чинників зміни характеру підприємницької діяльності, впливаючи на бізнес-процеси, управлінські рішення та взаємодію підприємств із ринковим і інституційним середовищем. Одночасно з цим посилюються глобальні екологічні виклики, зокрема зростання антропогенного навантаження на довкілля, виснаження природних ресурсів та загострення кліматичних ризиків, що вимагає переорієнтації підприємництва на принципи сталого розвитку [1].

Незважаючи на активне впровадження цифрових технологій у підприємницьку практику, у більшості випадків цифровізація розглядається переважно як інструмент підвищення економічної ефективності, тоді як її потенціал у забезпеченні екологічної орієнтації підприємництва використовується фрагментарно. Відсутність системного підходу до поєднання цифрової трансформації та екологічних принципів ускладнює формування стійких бізнес-моделей, здатних одночасно забезпечувати економічні результати та зменшення негативного впливу на довкілля.

Таким чином, актуальною науковою проблемою є відсутність цілісної концептуальної моделі, яка б узагальнювала взаємозв'язок між цифровими технологіями, екологічною орієнтацією та розвитком підприємництва, а також визначала напрями їх інтеграції в умовах цифрової трансформації.

**Актуальність дослідження** зумовлена необхідністю переосмислення ролі підприємництва в умовах цифрової трансформації та зростаючих екологічних викликів. Сучасні тенденції розвитку економіки свідчать про поступовий перехід від традиційних моделей підприємницької діяльності до інноваційних, цифрово орієнтованих підходів, які створюють нові можливості для екологізації бізнес-процесів [2].

Цифрові технології, зокрема хмарні сервіси, аналітика великих даних, системи управління ресурсами, цифрові платформи та інструменти прозорості ланцюгів створення вартості, мають значний потенціал для зниження ресурсомісткості виробництва, оптимізації споживання енергії та мінімізації екологічних ризиків. Водночас відсутність науково обґрунтованих концептуальних моделей стримує їх системне впровадження у практику екологічно орієнтованого підприємництва.

У цьому контексті розробка концептуальної моделі розвитку екологічно орієнтованого підприємництва в умовах цифрової трансформації є своєчасною та науково значущою. Таке дослідження сприятиме формуванню теоретичних засад інтеграції цифрових та екологічних підходів, а також створенню методологічної основи для подальших прикладних досліджень у сфері управління підприємством та сталого розвитку.

**Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.**

Дослідження, представлене у статті, спрямоване на розв'язання актуальних наукових і практичних завдань, пов'язаних із трансформацією підприємницької діяльності в умовах посилення екологічних вимог та цифровізації економіки. Запропонований авторський підхід орієнтований на формування цілісного бачення розвитку екологічно орієнтованого підприємництва шляхом інтеграції цифрових технологій, екологічних принципів та управлінських механізмів.

Результати дослідження узгоджуються з євроінтеграційним курсом України та процесами гармонізації національного законодавства з правом Європейського Союзу у сфері охорони довкілля, сталого розвитку та цифрової економіки. Авторський доробок корелює з сучасними європейськими підходами до екологічного регулювання, зокрема з положеннями Європейського зеленого курсу (European Green Deal), який визначає стратегічні орієнтири щодо досягнення кліматичної нейтральності, зменшення рівня забруднення та підвищення ресурсоефективності економіки [3].

Важливим аспектом Європейського зеленого курсу є акцент на використанні цифрових інструментів для підвищення прозорості, ефективності та обґрунтованості управлінських рішень у сфері екологічної політики та підприємницької діяльності. У цьому контексті розробка концептуальної моделі розвитку екологічно орієнтованого підприємництва в умовах цифрової трансформації відповідає сучасним науковим завданням щодо поєднання цифровізації та екологізації економіки.

Практичне значення авторського доробку полягає у можливості використання запропонованих положень і концептуальної моделі в діяльності підприємств, органів державного управління та інституцій підтримки підприємництва з метою адаптації до сучасних європейських стандартів екологічної безпеки, сталого розвитку та цифрового управління.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблематика зменшення техногенного навантаження на довкілля та вдосконалення природоохоронної діяльності в умовах цифрової трансформації є предметом досліджень багатьох вітчизняних і зарубіжних науковців. У сучасних наукових публікаціях значна увага приділяється питанням екологічної безпеки, екологічного моніторингу та управління антропогенним впливом на навколишнє середовище, зокрема через впровадження цифрових інструментів збору, обробки й аналізу екологічної інформації.

У працях українських учених висвітлюються підходи до цифровізації екологічного моніторингу, використання геоінформаційних систем та сучасних цифрових засобів контролю стану атмосферного повітря, водних об'єктів і ґрунтів, а також інструменти оцінювання ефективності природоохоронних заходів [4; 5]. Вітчизняні дослідження також акцентують увагу на необхідності удоскона-

лення державної та корпоративної системи моніторингу довкілля для підвищення результативності управлінських рішень у сфері охорони навколишнього середовища [6].

Окремий напрям наукових робіт присвячений упровадженню систем екологічного менеджменту відповідно до вимог міжнародних стандартів, зокрема ISO 14001:2015, як інструменту зниження негативного впливу підприємств на довкілля [7; 8; 9]. При цьому екологічний менеджмент у вітчизняних публікаціях часто розглядається переважно як організаційно-управлінський механізм забезпечення екологічної відповідності, тоді як цифрові технології в основному виконують функцію підтримки екологічного контролю та звітності [10].

У зарубіжних дослідженнях значна увага приділяється розвитку цифрових екологічних технологій, пов'язаних із використанням сенсорних мереж, Інтернету речей (IoT), автоматизованих систем екологічного моніторингу та інструментів аналізу великих масивів екологічних даних. Такі технології застосовуються для оперативного контролю якості атмосферного повітря, водних ресурсів, а також для оцінювання впливу виробничих процесів на довкілля [11; 12]. Зарубіжні автори підкреслюють, що інтеграція цифрових екологічних даних у процеси прийняття рішень підвищує ефективність природоохоронних технологій і сприяє зменшенню техногенного навантаження [13].

Окремі наукові публікації присвячені формуванню систем підтримки прийняття рішень на основі цифрових екологічних даних, що дозволяють реалізувати превентивний підхід до захисту довкілля та забезпечити управління екологічними параметрами виробничих систем у режимі реального або наближеного до реального часу [14; 15].

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** Проведений аналіз наукових досліджень і публікацій свідчить про наявність значного теоретичного та прикладного доробку у сфері цифровізації екологічного моніторингу, екологічного менеджменту та застосування цифрових технологій для зниження техногенного навантаження на довкілля. Водночас більшість наявних досліджень зосереджена на окремих інструментах або функціональних аспектах екологічної діяльності підприємств, не формуючи цілісного бачення розвитку екологічно орієнтованого підприємництва в умовах цифрової трансформації.

Зокрема, у науковій літературі недостатньо систематизовано взаємозв'язки між цифровими технологіями, управлінськими механізмами та екологічними принципами підприємницької діяльності. Цифровізація здебільшого розглядається як інструмент підвищення ефективності моніторингу або екологічного контролю, тоді як її роль у трансформації бізнес-моделей та стратегій розвитку підприємни-

цтва з екологічною орієнтацією залишається фрагментарно висвітленою.

Крім того, наукові публікації рідко приділяють увагу концептуалізації цифрової трансформації як комплексного чинника, що впливає одночасно на економічні, екологічні та управлінські параметри підприємницької діяльності. Відсутність узагальненої концептуальної моделі ускладнює практичне застосування результатів досліджень та стримує формування системних підходів до розвитку екологічно орієнтованого підприємництва.

У зв'язку з цим недостатньо вирішеною залишається наукова проблема формування концептуальної моделі розвитку екологічно орієнтованого підприємництва в умовах цифрової трансформації, яка б поєднувала цифрові технології, екологічні вимоги та управлінські механізми в єдину цілісну систему. Саме на розв'язання цієї проблеми спрямована означена стаття.

**Новизна.** Наукова новизна дослідження полягає в узагальненні та розвитку підходів до формування концептуальної моделі розвитку екологічно орієнтованого підприємництва в умовах цифрової трансформації. У роботі обґрунтовано доцільність розгляду цифрових технологій не лише як інструментів екологічного контролю або моніторингу, а як системного чинника, що впливає на трансформацію підприємницьких моделей, управлінських рішень та екологічних практик.

Запропонований підхід дозволяє інтегрувати екологічні принципи, цифрові інструменти та управлінські механізми в єдину концептуальну рамку, що забезпечує комплексне бачення розвитку підприємництва в умовах цифровізації. Отримані результати розширюють теоретичні уявлення про взаємозв'язок цифрової трансформації та екологічної орієнтації підприємницької діяльності й створюють підґрунтя для подальших прикладних досліджень у сфері управління сталим розвитком підприємництва.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне значення дослідження полягає у формуванні системного підходу до аналізу розвитку екологічно орієнтованого підприємництва в умовах цифрової трансформації. Запропонована концептуальна модель ґрунтується на поєднанні положень теорії сталого розвитку, екологічного менеджменту та цифрової економіки, що дозволяє розглядати підприємницьку діяльність як комплексну соціально-економічну систему з урахуванням екологічних обмежень і цифрових чинників.

Отримані результати мають загальнонаукове значення, оскільки сприяють поглибленню теоретичних уявлень про взаємозв'язок цифровізації та екологічної орієнтації підприємництва, а також можуть бути використані як методологічна основа для подальших досліджень у галузі екологічної економіки, управління підприємництвом та сталого розвитку. Запропонований підхід дозволяє адаптувати методи

системного аналізу та концептуального моделювання до дослідження складних міждисциплінарних процесів, що формуються на перетині цифрових технологій, екологічних вимог і управлінських рішень.

**Виклад основного матеріалу.** Цифрова трансформація сучасної економіки зумовлює суттєві зміни у характері та змісті підприємницької діяльності, формуючи нові підходи до управління, організації виробництва та взаємодії з ринковим середовищем. Підприємництво в умовах цифровізації поступово переходить від традиційних моделей функціонування до більш гнучких, інноваційних та інформаційно насичених форм, у яких цифрові технології виступають ключовим чинником створення доданої вартості.

Паралельно з цифровими трансформаційними процесами посилюється вплив екологічних факторів на розвиток підприємництва. Зростання екологічних ризиків, підвищення вимог до екологічної безпеки та реалізація принципів сталого розвитку актуалізують необхідність формування екологічно орієнтованих підприємницьких моделей. У цьому контексті цифрові технології набувають особливого значення як інструменти, що дозволяють поєднати економічну ефективність із зменшенням негативного впливу на довкілля.

Одним із базових напрямів цифрової трансформації підприємництва є цифровізація управління ресурсами та бізнес-процесами. Використання сучасних інформаційних систем управління, аналітичних платформ і цифрових сервісів сприяє підвищенню прозорості процесів, оптимізації використання матеріальних, енергетичних і фінансових ресурсів, а також зниженню рівня ресурсних втрат. У межах екологічно орієнтованого підприємництва це створює передумови для скорочення споживання природних ресурсів, мінімізації утворення відходів і зменшення техногенного навантаження на довкілля.

Одним із найбільш практично значущих напрямів цифрової трансформації підприємництва є оптимізація використання ресурсів за допомогою цифрових систем управління. Зокрема, ERP-системи (Enterprise Resource Planning – системи планування ресурсів підприємства) та CRM-системи (Customer Relationship Management – системи управління взаємовідносинами з клієнтами) забезпечують структурований облік і контроль закупівель, запасів, виробничих процесів, збуту та логістики [16; 17]. Це дозволяє підвищити керованість операційної діяльності, зменшити надлишкове споживання матеріалів, енергоресурсів і води, мінімізувати утворення відходів, а також підтримувати прийняття управлінських рішень з урахуванням екологічних пріоритетів підприємницької діяльності.

Важливою складовою цифрової трансформації є використання цифрових технологій збору, обробки та аналізу даних. Аналітика великих даних, автоматизовані системи моніторингу та інтелектуальні

інформаційні рішення дозволяють підприємствам здійснювати постійний контроль за екологічними параметрами діяльності, своєчасно виявляти потенційні екологічні ризики та приймати обґрунтовані управлінські рішення [18]. Це забезпечує перехід від реактивних підходів до превентивного управління екологічними аспектами підприємницької діяльності.

Цифрова трансформація також впливає на формування та функціонування ланцюгів створення вартості. Розвиток цифрових платформ, електронної комерції та цифрових каналів комунікації сприяє скороченню логістичних операцій, оптимізації транспортних потоків і зменшенню пов'язаних із ними екологічних навантажень [19]. Крім того, цифрові інструменти забезпечують можливість інформування споживачів про екологічні характеристики продукції та послуг, що сприяє формуванню культури відповідального споживання [20].

Варто відзначити і **тренд на мобільність бізнесу**, що проявляється у переході підприємств на хмарні сервіси та мобільні додатки. Для малих компаній це дозволяє працювати у форматі «віддалених офісів», скорочуючи потребу в оренді приміщень і споживанні комунальних ресурсів, що опосередковано знижує екологічне навантаження.

Не менш важливе значення в умовах екологічно орієнтованого підприємництва має забезпечення прозорості та підвітності діяльності. Цифрові системи обліку, платформи управління даними та інструменти відстеження ланцюгів постачання створюють можливості для підтвердження відповідності підприємницької діяльності екологічним стандартам і нормативним вимогам. Додаткові можливості у цьому напрямі забезпечують технології блокчейн, які можуть використовуватися для підвищення достовірності та простежуваності даних щодо походження продукції, екологічних атрибутів і виконання зобов'язань у ланцюгу створення вартості [21]. Це підвищує рівень довіри з боку споживачів, партнерів та регуляторних органів, а також стимулює підприємства до впровадження екологічно відповідальних управлінських практик.

Окремим практичним напрямом цифрової трансформації є впровадження електронного документообігу та хмарних сервісів управління даними, що скорочує паперовий документообіг і пов'язані з ним витрати ресурсів. Екологічний ефект електронного документообігу проявляється не лише у зменшенні використання паперу, а й у скороченні ресурсних витрат на друк і логістику, обсягу супутніх відходів та підвищенні простежуваності управлінських процедур [22]. Перехід до електронних форматів узгодження, звітності та обміну інформацією підвищує оперативність управління, забезпечує кращу керованість процесів і сприяє зниженню екологічного навантаження.

Оцінювання результативності впровадження цифрових рішень доцільно здійснювати через

систему ключових показників, що відображають ресурсоефективність, рівень утворення відходів і викидів, а також забезпечують основу для моніторингу та коригування управлінських рішень (табл 1).

Таким чином, цифрова трансформація виступає не лише технологічним процесом, а системним чинником зміни підприємницької діяльності, який створює умови для інтеграції екологічних принципів у стратегії розвитку підприємництва. Узагальнення зазначених положень дозволяє розглядати цифрові технології як основу формування концептуальної моделі розвитку екологічно орієнтованого підприємництва, що поєднує економічні, екологічні та управлінські аспекти в єдину цілісну систему.

Запропонована модель розглядає підприємництво як відкриту соціально-економічну систему, розвиток якої визначається взаємодією технологічних, управлінських, екологічних та інституційних чинників. У межах такого підходу цифрові технології інтерпретуються не лише як інструменти підвищення оперативної ефективності, а як системний фактор, що трансформує підприємницькі процеси, логіку прийняття рішень і механізми забезпечення екологічної відповідальності.

Концептуальна модель базується на логіці «драйвери – інтеграційні механізми – реалізація у процесах – результати – зворотний зв'язок». До ключових драйверів віднесено:

- екологічні виклики та вимоги (посилення екологічних стандартів, зростання запитів стейкхолдерів щодо екологічності, необхідність зниження техногенного навантаження);
- цифрові драйвери (поширення даних, платформ, автоматизації, аналітики та цифрових сервісів).

Взаємодія зазначених драйверів формує потребу в інтеграції екологічних принципів у підприємницькі стратегії та операційну діяльність на основі цифрових інструментів.

Центральним ядром моделі виступають **управлінські механізми інтеграції**, які забезпечують перетворення зовнішніх драйверів на внутрішні рішення та практики. До таких механізмів належать: стратегічне та процесне управління з урахуванням екологічних пріоритетів, екологічний менеджмент і ризик-менеджмент, система показників екологічної результативності та ресурсоефективності, а також інструменти цифрової підзвітності й контролю. При

Таблиця 1

**Напрями цифрової трансформації підприємництва та її екологічні ефекти з прикладами ключових показників**

Напрямок цифрової трансформації	Приклади цифрових рішень	Процеси, що оптимізуються	Екологічний ефект	Приклади ключових показників
Управління ресурсами та операціями	ERP-системи, системи обліку, цифрове планування	Закупівлі, запаси, виробничі операції, споживання енергії та води	Зниження ресурсомісткості, скорочення втрат і відходів	Енергоемність і водоемність на одиницю продукції; частка відходів; частка вторинної сировини
Управління взаємовідносинами та попитом	CRM-системи, цифрові канали збуту	Прогноз попиту, планування продажів, сервіс, комунікації	Зменшення перевиробництва, оптимізація товаропотоків	Точність прогнозування попиту; частка списань/повернень; частка екологічно чистих продуктів у продажах
Дані, моніторинг і аналітика	Аналітика даних, інформаційні панелі (панелі моніторингу), автоматизований моніторинг	Контроль екологічних параметрів, аналіз відхилень, прогнозування ризиків	Превентивне управління, зниження екологічних ризиків	Кількість екологічних інцидентів; час реагування; частка процесів з онлайн-контролем
Цифровізація ланцюгів постачання і логістики	Цифрове планування маршрутів, відстеження постачання, платформи взаємодії	Маршрути, складські процеси, координація постачальників	Зменшення транспортного навантаження та пов'язаних викидів забруднюючих речовин	Витрати пального; частка оптимізованих маршрутів; коефіцієнт заповнюваності транспорту; питомі викиди CO <sub>2</sub>
Електронний документообіг та хмарні сервіси	Електронні документи, хмарне зберігання, цифрові підписи	Документообіг, узгодження, звітність, обмін даними	Зниження обсягів використання паперу, підвищення прозорості	Частка електронних документів; використання паперу; середній час узгодження звітності; частка цифрових звітів

цьому управлінські механізми у моделі виконують роль зв'язувальної ланки між цифровими можливостями та екологічними цілями, формуючи цілісний підхід до розвитку підприємництва.

Важливою складовою управлінських механізмів інтеграції в моделі виступає екологічний менеджмент, який забезпечує планування, реалізацію та контроль екологічних аспектів підприємницької діяльності на основі встановлених цілей і ключових показників. Поєднання процедур екологічного менеджменту з цифровими інструментами обліку, аналітики та звітності підвищує прозорість управління, підтримує превентивний підхід до екологічних ризиків і сприяє дотриманню екологічних вимог у процесах створення вартості.

Реалізація моделі відбувається через трансформацію **основних підприємницьких процесів**: управління ресурсами, виробництво/надання послуг, логістика та ланцюги постачання, маркетинг і комунікації зі стейкхолдерами. Використання цифрових рішень у цих процесах створює умови для підвищення прозорості, скорочення ресурсних втрат, зменшення відходів, оптимізації транспортних операцій і підсилення превентивного підходу до управління екологічними ризиками. Наприклад, цифрові системи обліку й аналітики підтримують управління ресурсами та відстеження екологічних параметрів;

цифрові платформи взаємодії й електронні канали збуту сприяють оптимізації логістики та формуванню попиту на екологічно відповідні продукти й послуги; цифрові засоби контролю та звітності підвищують рівень довіри та підзвітності підприємницької діяльності.

Рамкові умови розвитку екологічно орієнтованого підприємництва створює інституційне середовище. Воно включає регуляторну політику, стандарти та вимоги, економічні стимули, цифрові сервіси підтримки підприємництва, партнерства та механізми поширення кращих практик. У моделі інституційне середовище виконує подвійну функцію: з одного боку, формує вимоги й обмеження, з іншого – створює стимули та можливості для масштабування цифрово-екологічних рішень (рис. 1).

Результати впровадження моделі проявляються у трьох взаємопов'язаних групах ефектів: **екологічних** (зростання ресурсоефективності, зменшення відходів і техногенного навантаження, зниження екологічних ризиків), **економічних** (підвищення ефективності та конкурентоспроможності, інноваційність, стійкість бізнес-моделей) та **соціально-управлінських** (прозорість, підзвітність, довіра стейкхолдерів, підвищення якості управлінських рішень). Модель також передбачає наявність **зворотного зв'язку**, заснованого на

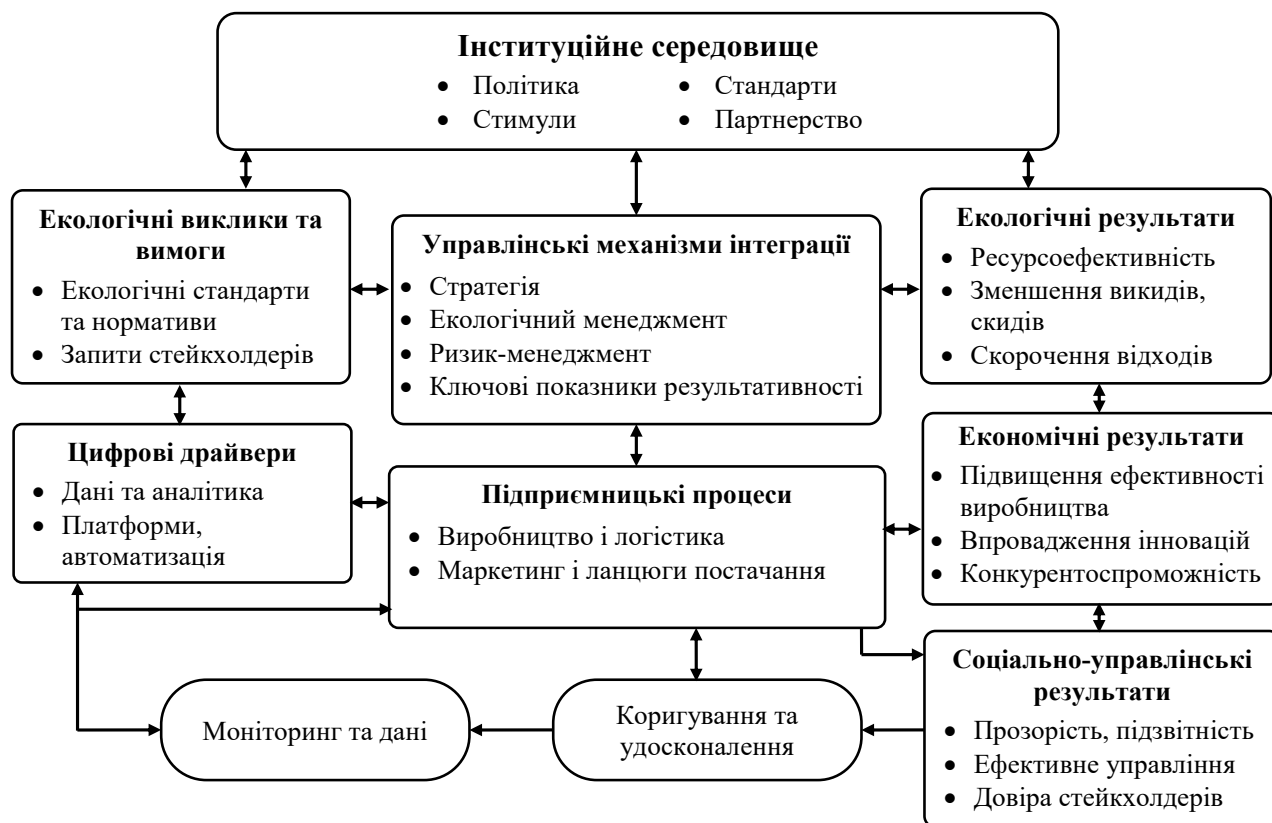


Рис. 1. Концептуальна модель розвитку екологічно орієнтованого підприємництва в умовах цифрової трансформації

даних моніторингу та оцінювання ключових показників, що забезпечує постійне коригування управлінських рішень і удосконалення підприємницьких процесів відповідно до екологічних вимог і цифрових можливостей.

Перевагою запропонованої моделі є її універсальність. Вона може бути адаптована до різних видів і форм підприємництва, оскільки базується на загальних механізмах цифрової трансформації та екологізації діяльності. Зміст окремих елементів (зокрема ключових показників результативності, набору цифрових інструментів або регуляторних вимог) може уточнюватися відповідно до галузевої специфіки та умов функціонування підприємств, однак загальна логіка моделі зберігає свою прикладну цінність як основа для практичної реалізації.

Впровадження запропонованої концептуальної моделі розвитку екологічно орієнтованого підприємництва в умовах цифрової трансформації може ускладнюватися низкою бар'єрів, серед яких доцільно виокремити фінансові (витрати на цифрові рішення, інтеграцію та підтримку), кадрово-компетентнісні (нестача цифрових і еко-управлінських компетенцій) [23], організаційні (опір змінам, незрілість внутрішніх процедур екологічного менеджменту), технологічно-інформаційні (несумісність систем, якість і доступність даних) та інституційні (обмежені стимули, фрагментарність підтримки та регуляторні невизначеності). Врахування зазначених чинників є необхідною умовою практичного застосування моделі для досягнення очікуваних екологічних і економічних результатів.

**Висновки.** Узагальнення наукових підходів і сучасних тенденцій засвідчило, що цифрова тран-

сформація є системним чинником розвитку підприємництва та водночас створює додаткові можливості для екологізації підприємницької діяльності через підвищення ресурсоефективності, прозорості та превентивного управління екологічними ризиками. Отримані результати та запропонована концептуальна модель розвитку екологічно орієнтованого підприємництва в умовах цифрової трансформації створюють підґрунтя для переходу від фрагментарного використання цифрових рішень до цілісного управлінського підходу, в якому екологічні цілі інтегруються у цифрові бізнес-процеси та підтримуються даними моніторингу.

Практичне застосування запропонованих положень доцільно реалізовувати поетапно: від цифровізації обліку та планування ресурсів до формування стабільної системи контролю та підзвітності, що дозволяє накопичувати екологічний ефект і знижувати ризики «точкових» впроваджень без управлінського супроводу. Важливим інструментом управління результативністю є система ключових показників, яка має використовуватися не лише для звітності, а й для регулярного перегляду управлінських рішень, пріоритетизації інвестицій у цифрові та природоохоронні заходи і підвищення прозорості взаємодії зі стейкхолдерами

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення галузевих наборів ключових показників, методики оцінювання сукупних ефектів цифрово-екологічної трансформації (екологічних, економічних і соціально-управлінських), а також перевірку запропонованих взаємозв'язків на прикладах діяльності підприємств або за результатами експертного опитування.

### Література

1. Gazzola P., Gonzalez Del Campo A., Onyango V. Going green vs going smart for sustainable development: Quo vadis? *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 214. P. 881–892. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.234>.
2. Цифрові трансформації для забезпечення еколого-економічного розвитку та цивільного захисту : монографія / В. І. Вороненко та ін. ; за заг. ред. О. В. Кубатка, В. І. Вороненка. Суми : СумДУ, 2025. 195 с.
3. The European Green Deal. European Commission. Brussels, 11.12.2019. COM(2019) 640 final. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52019DC0640> (дата звернення: 22.01.2026).
4. Фінін Г.С., Шевченко Р.Ю. Сучасні цифрові технології супутникового моніторингу та електронний геокартоінформаційний інструментарій доступу до екологічної інформації. *Екологічні науки*. 2022. № 1(40). С. 38–45. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.1-40.7>.
5. Шевченко Р.Ю. Захист національних геопросторових екологічних даних України під час воєнного стану та повоєнного устрою. *Екологічні науки*. 2023. № 1(46). С. 21–25. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.1-46.4>.
6. Моніторинг довкілля: Аналітична записка щодо стану та перспектив розвитку державної системи моніторингу довкілля. Київ: Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України; Команда підтримки реформ, 2023. 119 с.
7. Gorlova O.P. The impact of enterprise's EMS on ecosystem sustainability: from ISO 14001 requirements to open environmental policy and sustainable environmental behavior. *Market economy: modern management theory and practice*. 2023. Vol. 22, Issue 3. P. 49–77. DOI: [https://doi.org/10.18524/2413-9998.2023.3\(55\).302841](https://doi.org/10.18524/2413-9998.2023.3(55).302841).
8. Шушпанов Д., Кривокульська Н. Екологічний менеджмент як інструмент екологізації економіки. *Економічний дискурс*. 2024. Вип. 1-2. С. 90–101. DOI: <https://doi.org/10.36742/2410-0919-2024-1-10>
9. Системи екологічного управління: сучасні тенденції та міжнародні стандарти: посібник / С.В. Берзіна, І.І. Ярьєцьковська та ін. Київ: Інститут екологічного управління та збалансованого природокористування, 2017. 134 с.
10. Воронкова В.Г., Нікітенко В.О., Метеленко Н.Г., Ажажа М.А. Цифровізація екологічного менеджменту та охорони довкілля як інструмент сталого розвитку. *Ukrainian science and education in the conditions of European integration*. URL: <https://surl.li/gstmehj> (дата звернення: 23.01.2026).

11. García L., Garcia-Sanchez A.-J., Asorey-Cacheda R., Garcia-Haro J., Zúñiga-Cañón C.L. Smart Air Quality Monitoring IoT-Based Infrastructure for Industrial Environments. *Sensors*. 2022. № 22. 9221. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22239221>.
12. Ansari M., Alam M. An Intelligent IoT-Cloud-Based Air Pollution Forecasting Model Using Univariate Time-Series Analysis. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2024. № 49. P. 3135–3162. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13369-023-07876-9>.
13. Lanfranchi G., Crupi A., Cesaroni F. Internet of Things (IoT) and the Environmental Sustainability: A Literature Review and Recommendations for Future Research. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*. 2025. Vol. 32(6), P. 7648-7670. DOI: <https://doi.org/10.1002/csr.70098>.
14. Ramadan M.N.A., Ali M.A.H., Khoo S.Y., Alkhedher M., Alherbawi M. Real-time IoT-powered AI system for monitoring and forecasting of air pollution in industrial environment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2024. № 283. 116856. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116856>.
15. Mahmud D. An IoT-enabled decision support system for circular economy business models: A review of economic efficiency and sustainability outcomes. *American Journal of Scholarly Research and Innovation*. 2025. № 4(01). P. 250–286. DOI: <https://doi.org/10.63125/28kdxg31>.
16. Песцов В. ERP-системи в управлінні ресурсами малих і середніх аграрних підприємств: сутність, функції та переваги. *Економіка та суспільство*. 2024. № 68. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-68-147>.
17. Юрчук Н.П. CRM-системи: особливості функціонування та аналіз українського ринку. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Міжнародні економічні відносини та світове господарство*. 2019. Вип. 23. С. 141–147.
18. Malleswari S.M.S.D., Krishna Mohana T. Air pollution monitoring system using IoT devices: Review. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 51, Part 1. P. 1147–1150. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.114>.
19. Sarkar M. Environmental Sustainability under E-Commerce: A Holistic Perspective. *European Journal of Development Studies*. 2023. Vol. 3. Issue 3. 252. DOI: <https://doi.org/10.24018/ejdevelop.2023.3.3.252>.
20. Екологічна електронна комерція: Орієнтуючись у сталих практиках в онлайн-ритейлі. URL: <https://www.ranktracker.com/uk/blog/eco-friendly-e-commerce-navigating-sustainable-practices-in-online-retail/> (дата звернення: 23.01.2026).
21. Blessing A. Digital tools and AI: Using technology to monitor carbon emissions and waste at each stage of the supply chain, enabling real-time adjustments for sustainability improvements. *International Journal of Science and Research Archive*. 2024. № 13(01). P. 2741–2754. DOI: <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2024.13.1.1995>.
22. Environmental Benefits of Digital Document Management Systems. URL: <https://snohai.com/environmental-benefits-of-digital-document-management/> (дата звернення: 24.01.2026).
23. Андросова О.Ф. Цифрові інструменти на промислових підприємствах України. *Актуальні проблеми економіки*. 2025. № 1. Том 2 (283/2). С. 6–19. DOI: <https://doi.org/10.32752/1993-6788-2025-2-283-6-19>.

Дата першого надходження статті до видання: 30.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026

## ФЛОРИСТИЧНИЙ СКЛАД ТРАВ'ЯНОЇ РОСЛИННОСТІ ЗАЛІЗОРУДНИХ ВІДВАЛІВ КРИВОРІЖЖЯ: СТРУКТУРНІ АСПЕКТИ

Павленко А.О.

Криворізький ботанічний сад Національної академії наук України  
вул. Ботанічна, 50, 50089, м. Кривий Ріг  
[anolpavl@gmail.com](mailto:anolpavl@gmail.com)

Стаття присвячена виявленню специфіки флористичного складу трав'яної рослинності, яка формується на залізорудних відвалах найбільшого в Україні гірничо-видобувного регіону. Відвали утворюються внаслідок складування на земній поверхні розкритих порід, вилучених із шахт і кар'єрів, вони займають 18 тис. га і наразі є однією з провідних форм техногенного рельєфу Криворіжжя. Протягом 2004–2025 років обстежено сорок відвалів, які відрізняються за площею, конфігурацією, складом гірських порід та віком (40–130 років). Отриманий нами видовий список трав'яної флори відвалів налічує 363 види судинних рослин, які належать до 220 родів, 51 родини та двох відділів. Десять провідних родин у систематичному спектрі трав'яної флори відвалів містять 67,6 % видів від їх загальної кількості. Здійснено порівняння різновеликих, але вміщуючих одна одну флор; при цьому флорою «нижчого» рангу є трав'яна флора відвалів, а «вищого» – урбанофлора Кривого Рогу. Показано, що в родових систематичних спектрах цих флор майже ідентичними є перші тріади (три провідних родини за кількістю видів), що включають Asteraceae, Poaceae та Fabaceae; другі тріади в аналізованих спектрах є подібними лише за положенням четвертого члену – родини Brassicaceae. У родових спектрах флор, що порівнюються, не спостерігається подібності щодо порядку розташування родів за зменшенням абсолютної кількості видів у їх складі, але доволі високі позиції займають одні й ті ж самі роди (*Astragalus*, *Veronica*, *Artemisia*, *Galium*, *Potentilla*, *Allium*, *Alyssum*, *Senecio*, *Euphorbia*, *Trifolium*, *Verbascum*, *Stipa*, *Inula*, *Iris*, *Gypsophila*). Ценоморфна структура трав'яної флори залізорудних відвалів в основних рисах є подібною до такої, що притаманна урбанофлорі Кривого Рогу, хоча і дещо спрощеною. Відсоткова представленість синантропофантів в обох спектрах ценоморф має близькі значення (36,9 % у спектрі трав'яної флори відвалів та 38,61 % у спектрі УФ), що є цілком закономірним з огляду на докорінну антропогенну трансформацію ландшафтів Криворіжжя. Висока частка степантів у трав'яній флорі залізорудних відвалів обумовлена «внеском» у загальний список аборигенних видів зі старовікових відвалів.

В умовах сучасних кліматичних змін трав'яна рослинність на залізорудних відвалах має ряд переваг перед деревною в аспекті життєвості, що слід враховувати в рекомендаціях з менеджменту рослинного покриву техногенних і постмайнінгових ландшафтів Криворізького регіону. *Ключові слова:* трав'яна рослинність, склад і структура флори, залізорудні відвали, Криворіжжя.

### Floristic composition of herbal vegetation of iron ore dumps in Kryvorizhzhia: structural aspects. Pavlenko A.

The article is devoted to revealing the specifics of the floristic composition of herbaceous vegetation, which is formed on iron ore dumps of the largest mining region in Ukraine. Dumps are formed as a result of storage on the earth's surface of overburden removed from mines and quarries, they occupy 18 thousand hectares and are currently one of the leading forms of technogenic relief of Kryvyi Rih. During 2004–2025, we surveyed forty dumps, which differ in area, configuration, rock composition and age (40–130 years). The species list of the herbaceous flora of the dumps obtained by us includes 363 species of vascular plants belonging to 220 genera, 51 families and two divisions. The ten leading families in the systematic spectrum of the herbaceous flora of the dumps contain 67.6% of the species of their total number. A comparison of floras of different sizes, but containing each other, was made; at the same time, the flora of the “lower” rank is the herbaceous flora of the dumps, and the “higher” one is the urban flora of Kryvyi Rih. It is shown that in the generic systematic spectra of these floras, the first triads (the three leading families in terms of the number of species) are almost identical, including Asteraceae, Poaceae, and Fabaceae; the second triads in the analyzed spectra are similar only in the position of the fourth member – the Brassicaceae family. In the genus spectra of the floras being compared, there is no similarity in the order of arrangement of genera in decreasing absolute number of species in their composition, but the same genera occupy quite high positions (*Astragalus*, *Veronica*, *Artemisia*, *Galium*, *Potentilla*, *Allium*, *Alyssum*, *Senecio*, *Euphorbia*, *Trifolium*, *Verbascum*, *Stipa*, *Inula*, *Iris*, *Gypsophila*). The cenomorphic structure of the herbaceous flora of iron ore dumps is similar in its main features to that inherent in the urban flora of Kryvyi Rih, although somewhat simplified. The percentage of synanthrophantes in both spectra of coenomorphs has similar values (36.9% in the spectrum of the grass flora of the dumps and 38.61% in the UF spectrum), which is quite natural given the radical anthropogenic transformation of the landscapes of Kryvyi Rih. The high proportion of steppes in the grass flora of iron ore dumps is due to the “contribution” to the general list of aboriginal species from ancient dumps.

In the conditions of modern climate change, grass vegetation on iron ore dumps has a number of advantages over woody vegetation in terms of vitality, which should be taken into account in recommendations for the management of vegetation cover in technogenic and post-mining landscapes of the Kryvyi Rih region. *Key words:* grass vegetation, composition and structure of flora, iron ore dumps, Kryvyi Rih region.



**Постановка проблеми та її актуальність.**

Гірничорудна промисловість України займає одне з провідних місць у світі за обсягом виробництва залізної руди; масштабним наслідком цієї діяльності є техногенез у геологічному та ландшафтному середовищах. Найбільших масштабів гірничі роботи набули у Криворізькому залізорудному басейні (Кривбас, Криворіжжя). У регіоні порушено близько 30 тис. га земель, із них 18 тис. га займають промислові відвали [21]. Відвали утворюються внаслідок складування на земній поверхні розкритих порід, вилучених із шахт і кар'єрів, і наразі є однією з провідних форм техногенного рельєфу. [26].

Вивчення процесів формування рослинного покриву у новостворених гірничо-промислових ландшафтах є актуальним завданням з огляду на те, що рослинна компонента являє собою визначальну складову технотопів та похідних від них біотопів (сформованих господарською діяльністю людини і напівприродних біотопів).

**Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.** Представлені матеріали є узагальненням результатів досліджень, здійснених у руслі виконання науково-дослідницьких робіт у відділі оптимізації техногенних ландшафтів Криворізького ботанічного саду НАН України за темами «Науково-практична оцінка та впровадження ефективних способів сприяння розвитку рослинного покриву на кар'єрно-відвальних комплексах Криворіжжя» (державний реєстраційний номер 0117U000830), «Адаптивні можливості стійких видів рослин та їх використання в оптимізації техногенно порушених земель Криворіжжя» (державний реєстраційний номер 0120U100510), «Розробка та впровадження системи коригуючого управління розвитком рослинного покриву техногенних екосистем Криворіжжя» (державний реєстраційний номер 0123U100648).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

В Україні питанням функціонування рослинності на кар'єрно-відвальних комплексах у різних регіонах України присвячена низка новітніх робіт [15, 27, 35].

Введення в експлуатацію відкритого способу видобутку корисних копалин у Криворізькому залізорудному басейні дало поштовх для розвитку теоретичних та практично-експериментальних робіт з фітооптимізації порушених земель. Прогнозні схеми розвитку відвальної рослинності, створені в процесі природничих досліджень регіону наприкінці ХХ – на ХХІ століть, включали чотири стадії: бур'янову, пірійну, перехідно-степову, степову [3], або ж початкову, активного розвитку, стабілізації, остепніння [4].

Специфіка формування трав'яної рослинності на залізорудних відвалах Криворізького регіону перебувала в полі зору Н. В. Хлизіної [30], Я. В. Маленко [16], Г. С. Сафонової та С. В. Реви [22], М. Г. Сметани зі співавторами [23], Я. В. Маленко зі співавторами

[17–18] та інших дослідників. В. В. Кучеревський та Г. Н. Шоль упорядкували анотований список урбанофлори Кривого Рогу, в якому в складі техногенного екоценофітону окремо виділили відвально-кар'єрний екофітон [12]. Н. С. Єременко, досліджуючи рудеральну рослинність Кривого Рогу, розробила синтаксономічну схему, в якій трав'яні угруповання відвалів входять до складу класів *Artemisietea vulgaris* Lohmeyer et al. in Tx. ex von Rochow 1951 та *Stellarietea mediae* Tx. et al. in Tx. 1950 [8–9].

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** Відомості щодо складу й структури трав'яної флори техногенних і постмайнінгових ландшафтів Криворіжжя на сьогодні є фрагментарними. В публікаціях дослідників природи регіону розглядаються й аналізуються флористичні списки, складені при обстеженні окремих відвальних урочищ. Так, на моніторингових ділянках чотирьох відвалів техногенного ландшафтного заказника «Візерка» виявлено 147 видів покритонасінних рослин [23]. Установлено, що флористичне різноманіття літофільних рослинних угруповань відвалів центральної та південно-східної зон Кривбасу складають 197 видів із 37 родин [29]; а початкових сукцесійних стадій на молодих відвалах, складених пухкими породами кайнозою, – 56 трав'яних видів із 15 родин [32].

Варто відзначити, що стосовно складу й структури дендрофлори залізорудних відвалів регіону наразі здійснені певні узагальнення [5, 14], проте щодо трав'яної флори такі відомості не опрацьовані.

**Мета дослідження** – виявлення специфіки систематичної та еколого-ценотичної структури трав'яної флори залізорудних відвалів Криворіжжя.

**Новизна.** Уперше укладено та систематизовано флористичні списки трав'яних рослин за результатами польового етапу інвентаризації видового складу рослинності техногенних екотопів, виявлені особливості систематичної та еколого-ценотичної структури трав'яної флори дослідженої території.

**Методологічне або загальнонаукове значення.** Пізнання закономірностей розвитку рослинних угруповань, зокрема, інвентаризація їх флористичного складу, а також аутсозологічна та синфітосозологічна оцінки, виявлення наявного і потенційного впливу чужорідних видів є основою для розробки науково обґрунтованої системи поводження з техногенно дестабілізованими землями.

**Матеріали та методи.** Криворіжжя (Криворізький природничо-господарський район із промисловим ядром у місті Кривий Ріг) територіально окреслюється за специфічним типом природокористування [26]. Окрім частини Криворізького району Дніпропетровської області до його теренів входять невеликі ділянки Бериславського району Херсонської, Баштанського району Миколаївської та Олександрійського району Кіровоградської областей

(відповідно до новітнього адміністративно-територіального устрою).

Протягом 2004–2025 років рослинний покрив низки залізородних відвалів обстежувався з використанням загальноприйнятих маршрутних методів [2]. Зазначимо, що на картосхемі позначено 34 об'єкти, але оскільки в складі окремих старовікових кар'єрно-відвальних комплексів налічується від двох до чотирьох невеликих за розмірами відвальних утворень, загалом кількість обстежених відвалів становить 40 (рис. 1, А). Обстежені відвали відрізняються за площею, конфігурацією, складом гірських порід та віком (40–130 років). Залежно від часу експлуатації відвали зазвичай поділяють на молоді, де активно триває відсіпання породи на більшій частині їх поверхні; середньовікові (або зрілі), де відсіпання породи проводиться тільки з одного боку; старовікові, на яких відсіпання породи давно припинене. Вік існування відвальних екоотопів значною мірою детермінує розвиток трав'яної рослинності: на нещодавно відсіпаних субстратах панують рудеральні угруповання; після досягнення віку відсіпки 40–70 років спостерігається виникнення локусів із переважанням багаторічних аборигенних трав; на старовікових відвалах (100 років і більше) формуються «квазістепові» ценоструктури [11] (рис. 1, В, С, D). Флористичний список складався в процесі камеральної обробки гербарних зборів. Гербарні зразки ідентифікували за «Флорою УРСР» [28]. Сучасні таксономічні назви наводили за Plant of the World online (POWO, 2025) [34].

Згідно з поняттями сучасної порівняльної флористики щодо повної та неповної територіальної сукупності видів (за Б. А. Юрцевим) остання являє собою частину їх повної територіальної сукупності, виділену за певними ознаками [13]. Таким чином, трав'яну флору залізородних відвалів ми розглядаємо як неповну територіальну сукупність видів, при цьому в нашому випадку повною територіальною сукупністю видів слугує урбанофлора Кривого Рогу.

Аналіз систематичної структури трав'яної флори відвалів здійснили із застосуванням методів та принципів А. І. Толмачова, на які опираються вітчизняні ботаніки [1, 10, 19–20]. Ценоморфи в структурі трав'яної флори відвалів визначили за системою О. Л. Бельгарда, яка була доповнена в роботах В. В. Тарасова [24] та Б. О. Барановського [33]; як уточнення ми використали відомості щодо ценотипів із багатотомного видання «Екофлора України» [6–7].

**Виклад основного матеріалу.** Аналіз флористичного складу рослинності включає показники співвідношення між різними групами вищих рослин і відображає відсотки загальної кількості видів та родин. Отриманий нами видовий список трав'яної флори відвалів налічує 363 види судинних рослин, які належать до 220 родів, 51 родини та двох відділів (Polypodiophyta та Magnoliophyta). Важливо підкреслити, що до списку видового складу трав'яної

рослинності ми включили і напівчагарнички, позаяк вони є практично неодмінною компонентою «квазі-степових» угруповань.

Одним із аспектів систематичного аналізу аналізу є порівняння різновеликих, але вміщуючих одна одну флор. При порівнянні флор «нижчого» та «вищого» рангу другі використовуються як еталон для перших з точки зору їх типовості. Таким «еталоном» у нашому випадку може слугувати родинний спектр урбанофлори (УФ) Кривого Рогу, детальний аналіз якої здійснила Г. Н. Шоль [31].

Десять провідних родин у систематичному спектрі трав'яної флори відвалів містять 67,6 % видів від їх загальної кількості (рис. 2).

До першої тріади (трьох перших родин у спектрі) в обох випадках входять родини Asteraceae, Poaceae та Fabaceae, але в родинному спектрі урбанофлори частка Asteraceae та Fabaceae зменшена (відповідно 14,3 % та 6,3 %), а Poaceae – збільшена (8,9 %). Перші дві родини майже без виключень є обов'язковими членами «головної» частини у флорах Голарктичного флористичного царства. Щодо родини Fabaceae, то її положення на третьому місці за чисельністю видів свідчить про середземноморський характер флор [19].

Другі тріади в аналізованих спектрах є подібними лише за положенням четвертого члену – родини Brassicaceae (яка посідає провідні позиції у спектрах трансформованих флор), але розрізняються за положенням п'ятого та шостого членів. У спектрі УФ п'яте місце посідає Rosaceae, що обумовлено вагомою часткою дерев і кущів у її складі, але в складі «відвальної» трав'яної флори ця родина не увійшла навіть до провідної десятки. «Висунення» на п'яте місце Caryophyllaceae у спектрі трав'яної флори відвалів пояснюється тим, що за відношенням до типів ценозів, значний відсоток у ній складають петрофанги [25]. Цілоком природно, що сприятливими для існування представників цієї родини є техногенні літотопи. Загалом наявність серед провідних родин Lamiaceae, Brassicaceae, Caryophyllaceae та Apiaceae (як і Fabaceae, на що вказано вище) свідчить про зв'язки флор із Середземномор'ям [19].

Показовим у систематичному аналізі є родовий спектр. Крупних поліморфних родів, які включають від 10 до 20 видів, у дослідженій флорі залізородних відвалів не виявлено. Невеликих, але присутніх у головній частині спектру родів, у яких представлено 5–9 видів, налічується вісім; родів, що включають по 4 види – сім. У родових спектрах флор, що порівнюються, не спостерігається подібності щодо порядку розташування родів за зменшенням абсолютної кількості видів у їх складі, але доволі високі позиції займають одні й ті ж самі роди (табл. 1).

Еколого-ценотична структура флори відображає співвідношення груп видів, які об'єднуються за подібністю пристосувальних ознак до фітоценотичного середовища (ценоморфами). Найбільші частки

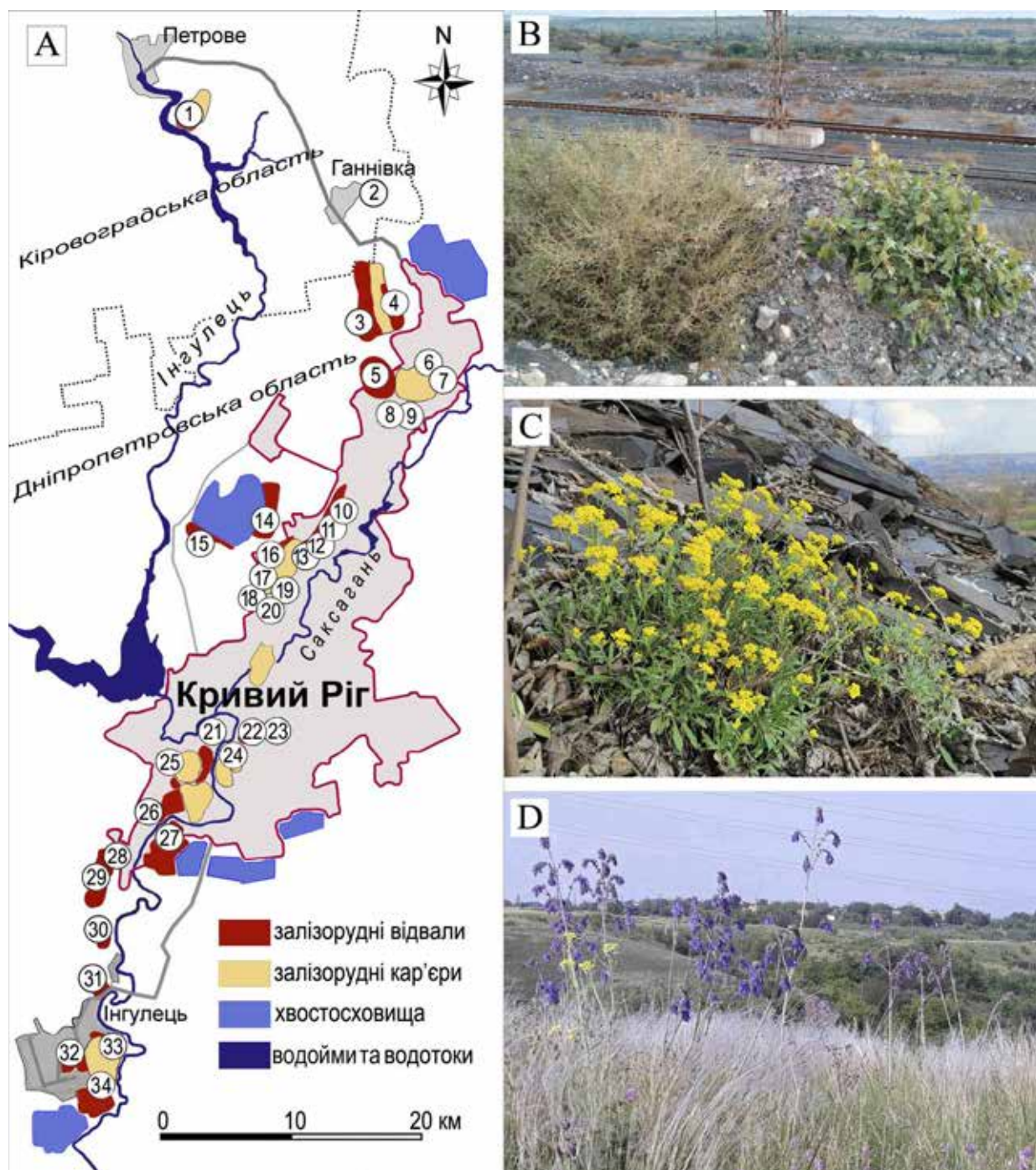


Рис. 1. Залізорудні відвали Криворіжжя. А – картосхема розташування відвалів: 1 – відвал (в.) Західно-Петрівський, 2 – в. старовинного рудника «Кочубейські штольні», 3 – в. Західно-Ганнівський, 4 – в. Східно-Ганнівський, 5 – в. залізничний Першотравневого рудника, 6 – в. автомобільний (північний) Першотравневого рудника, 7 – в. автомобільний (східний) Першотравневого рудника, 8 – чотири відвали старовинного рудника Колачевського, 9 – в. шахти «Тернівська», 10 – в. шахти ім. Фрунзе рудника «Сува Балка», 11 – в. № 9 шахти «Покровська», 12 – в. закритої шахти «Більшовик», 13 – два відвали старовинного рудника «Дубова Балка», 14 – в. № 3 Глеюватського кар'єру Центрального гірничозбагачувального комбінату (ЦГЗК), 15 – в. греблі обвалування хвостосховища ЦГЗК, 16 – в. «Південно-Західний» Глеюватського кар'єру, 17 – в. № 1 Глеюватського кар'єру, 18 – в. № 7 Глеюватського кар'єру, 19 – в. № 6 Глеюватського кар'єру, 20 – в. Петрівський Глеюватського кар'єру, 21 – в. № 2 кар'єру № 3-біс ПАТ АрселорМіттал Кривий Ріг (АМКР), 22 – в. «Нульовий» АМКР, 23 – в. «Північний» АМКР, 24 – в. «Бурицький» АМКР, 25 – в. № 1 кар'єру № 3-біс АМКР, 26 – в. «Правобережний» Південного гірничозбагачувального комбінату (ПВДГЗК), 27 – в. «Лівобережний» ПВДГЗК, 28 – два відвали старовинного рудника «Рахманівський», 29 – в. «2-3» ПАТ АМКР, 30 – в. старовинного рудника «Стародобровольський», 31 – в. чотири відвали техногенного ландшафтного заказника «Візирка», 32 – в. № 3 кар'єру Інгулецького гірничозбагачувального комбінату (ІНГЗК), 33 – в. № 1 кар'єру ІНГЗК, 34 – в. № 2 кар'єру ІНГЗК; В – *Kochia scoraria* (L.) Schrad. та *Xanthium albinum* (Widd.) Scholz у складі рудеральної рослинності молодого відвалу № 2 кар'єру ІНГЗК; С – *Aurinia saxatilis* (L.) Desv. на схилі середньовікового Петрівського відвалу; D – *Stipa lessingiana* Trin. et Rupr., *Salvia nutans* L. та *Erysimum diffusum* Ehrh. у складі «квасітенової» рослинності на старовинному Рахманівському відвалі

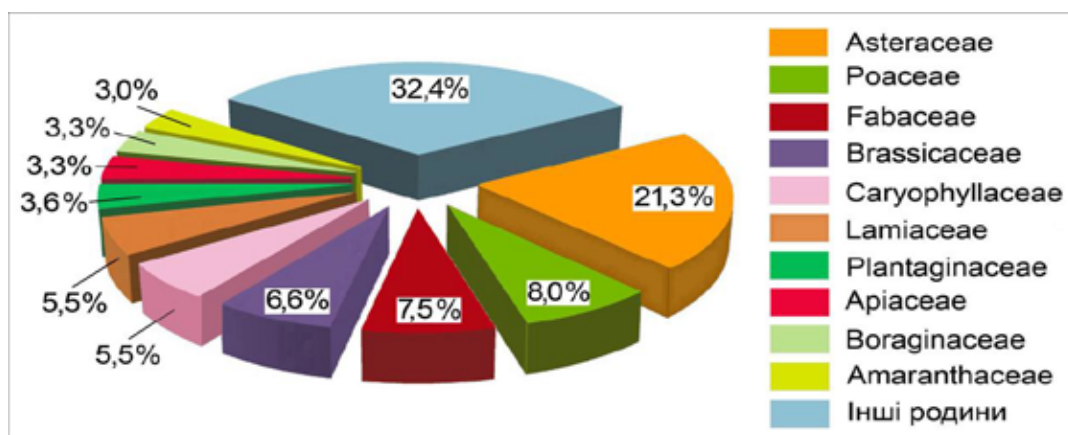


Рис. 2. Спектр провідних родин трав'яної флори залізорудних відвалів Криворіжжя

Таблиця 1

## Спектри найчисельніших родів трав'яної флори залізорудних відвалів та урбанofлори Кривого Рогу

Роди	Трав'яна флора залізорудних відвалів			Урбанofлора Кривого Рогу			
	позиція	абсолютна кількість	%	позиція	абсолютна кількість	%	
<i>Astragalus</i>	1	9	2,48	3–5	13	1,19	
<i>Veronica</i>	2–3	6	1,66	1	18	1,65	
<i>Artemisia</i>	2–3	6	1,66	12–13	9	0,83	
<i>Galium</i>	4–9	5	1,38	2	14	1,29	
<i>Potentilla</i>	4–9	5	1,38	3–5	13	1,19	
<i>Allium</i>	4–9	5	1,38	9–10	11	1,01	
<i>Alyssum</i>	4–9	5	1,38	34–42	5	0,46	
<i>Senecio</i>	4–9	5	1,38	34–42	5	0,46	
<i>Euphorbia</i>	10–17	4	1,1	3–5	13	1,19	
<i>Trifolium</i>	10–17	4	1,1	6–8	12	1,10	
<i>Verbascum</i>	10–17	4	1,1	17–23	0,64	7	0,64
<i>Stipa</i>	10–17	4	1,1	17–23	0,64	7	0,64
<i>Inula</i>	10–17	4	1,1	24–33	6	0,55	
<i>Iris</i>	10–17	4	1,1	24–33	6	0,55	
<i>Gypsophila</i>	10–17	4	1,1	34–42	5	0,46	

у складі дослідженої флори мають степанти та синантропофанти; і хоча степанти за кількістю видів посідають перше місце, ця перевага вкрай незначна (139 видів проти 134 відповідно). Щодо синантропофантів, то їх відсоткова представленість в обох спектрах ценоморф має близькі значення (36,9 % у спектрі трав'яної флори відвалів та 38,61 % у спектрі УФ) (табл. 2).

Провідне положення синантропофантів у спектрах є цілком закономірним з огляду на докорінне перетворення ландшафтів Криворіжжя та, відповідно, антропогенну трансформацію рослинного покриву. Закономірно високими є і частки у їх складі рудеральних видів (рудералосинантропофантів). Слід звернути увагу на наявність культурантів

у трав'яній флорі відвалів. Ці види виявили адаптивну здатність до існування в невласливих для них умовах як при використанні їх як у наукових рекультивацийних експериментах (*Crambe pontica* Steven ex Rupr., *Digitalis lanata* Ehrh., *Dracocephalum officinalis* L.), так і завдяки «народній рекультиваций» місцевих ентузіастів (*Tulipa gesneriana* L., *Stachys byzanthina* K. Koch, *Yucca filamentosa* L.) та «втечі з культури» (*Fragaria vesca* L., *Iris aphylla* L., *I. germanica* L., *I. lactea* Pall.).

Наступні три місця в ценоморфному спектрі дослідженої флори посідають пратанти (11,85 %), петрофанти (5,8 %) та псамофанти (2,75 %). Такий розподіл ценоморф створюється за рахунок «внеску» високого видового різноманіття старовікових відвалів, які

## Спектри ценоморф трав'яної флори залізородних відвалів та урбанofлори Кривого Рогу

Ценоморфи	Трав'яна флора залізородних відвалів		Урбанofлора Кривого Рогу	
	абс. кількість	%	абс. кількість	%
Сильванти	11	3,03	110	11,11
в тому числі: власне сильванти	3	0,83	49	4,5
маргосильванти	8	2,2	55	5,06
гігросильванти	–	–	6	0,55
Степанти	139	38,3	229	21,05
Петрофанти	21	5,8	91	8,36
в тому числі: еврипетрофанти	12	3,3	50	4,6
силікопетрофанти	4	1,1	23	2,11
карбопетрофанти	5	1,4	18	1,65
Псамофанти	10	2,75	28	2,57
Пратанти	43	11,85	100	9,19
Галофанти	4	1,1	38	3,49
Палюданти	1	0,28	54	4,96
Акванти	–	–	18	1,65
Синантропофанти	134	36,9	420	38,61
в тому числі:				
рудералосинантропофанти	108	29,75	249	22,89
сегеталосинантропофанти	9	2,47	76	6,99
урбаносинантропофанти (культуранти)	17	4,68	95	8,73
<b>Разом</b>	<b>363</b>	<b>100</b>	<b>1088</b>	<b>100</b>

є «акцепторами» діаспор аборигенних видів із прилеглих територій, де зберіглася природна рослинність.

Сильвантів та галофантів на відвалах значно менше, ніж у складі УФ, оскільки на відвалах мало поширені екотопи, придатні для їх розвитку. Палюдант виявлений лише один – *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. Хоча екологічним оптимумом цього виду вважаються біотопи прибережних та підтоплених ділянок, на відвалах він поселяється як піонерна рослина навіть на сухих субстратах. Акванти взагалі не відмічені через відсутність постійних водойм у відвальних ландшафтах. Загалом, ценоморфна структура трав'яної флори залізородних відвалів в основних рисах є подібною до такої, що притаманна УФ Кривого Рогу, хоча і дещо спрощеною.

**Головні висновки.** Флористичний склад трав'яної рослинності залізородних відвалів Криворіжжя представлений 363 видами вищих судинних рослин, які належать до 220 родів, 51 родини та двох відділів. До десяти провідних родин входять Asteraceae, Poaceae, Fabaceae, Brassicaceae, Caryophyllaceae, Lamiaceae, Plantaginaceae, Apiaceae, Boraginaceae,

Amarantaceae. Найвищі позиції в родовому спектрі займають роди *Astragalus* (9 видів), *Veronica* (6 видів) та *Artemisia* (6 видів).

Ценоморфна структура трав'яної флори залізородних відвалів в основних рисах є подібною до такої, що притаманна урбанofлорі Кривого Рогу, хоча і дещо спрощеною. Відсоткова представленість синантропофантів в обох спектрах ценоморф має близькі значення (36,9 % у спектрі трав'яної флори відвалів та 38,61 % у спектрі УФ), що є цілком законним з огляду на докорінну антропогенну трансформацію ландшафтів Криворіжжя. Висока частка степантів у трав'яній флорі залізородних відвалів обумовлена «внеском» у загальний список аборигенних видів зі старовікових відвалів.

**Перспективи використання результатів дослідження.** В умовах сучасних кліматичних змін трав'яна рослинність на залізородних відвалах має ряд переваг перед деревною в аспекті життєвості, що слід враховувати в рекомендаціях з менеджменту рослинного покриву техногенних і постмайнінгових ландшафтів Криворізького регіону.

## Література

1. Буджак В. В. Оцінка фіторізноманітності трав'яних екосистем басейнів Пруту і Сирету (в межах України) з використанням інформаційних технологій: дис. докт. біол. наук: 03.00.05. Київ, 2020. 718 с.
2. Геоботаніка: методичні аспекти досліджень / Б. Є. Якубенко та ін. Київ: Ліра, 2020. 316 с.

3. Добровольський І. А., Шанда В. І., Гасва Н. В. Характер і напрямки сингенезису в техногенних екотопах Кривбасу. *Укр. ботан. журн.* 1979. Т. 36, № 6. С. 524–541.
4. Денисик Г. І., Ярков С. В., Казаков В. Л. Сингенез рослинного покриву в ландшафтах зон техногенезу: монографія. Вінниця; Кривий Ріг: ПП «ТД «Едельвейс і К», 2012. 238 с.
5. Екологічна та геологічна зумовленість поширення дерев і чагарників на девастованих землях Криворіжжя / В. Савосько та ін. *Journ. Geol. Geograph. Geocology*, 2018, 27(1): 116–130. <https://doi.org/10.31812/123456789/2922>
6. Екофлора України. Том I / Дідух Я. П. та ін.; під заг. ред. Я. П. Дідуха. К.: Фітосоціоцентр, 2000. 283 с.
7. Екофлора України. Том III / Федорончук М. М. та ін.; під заг. ред. Я. П. Дідуха. К.: Фітосоціоцентр, 2002. 495 с.
8. Єременко Н.С. Рудеральна рослинність Кривого Рогу. I. Клас *Artemisietea vulgaris*. *Укр. ботан. журн.* 2017. Т. 74 № 5. С. 449–477. <https://doi.org/10.15407/ukrbotj74.05.449>
9. Єременко Н.С. Рудеральна рослинність міста Кривий Ріг. II. Клас *Stellarietea mediae*. *Укр. ботан. журн.* 2018. Т. 74 № 4. С. 356–372. <https://doi.org/10.15407/ukrbotj75.04.356>
10. Коломійчук В. П. Структура, динаміка та охорона фіторізноманітності узбережних екосистем Азовського моря: дис. докт. біол. наук: 03.00.05. Київ, 2020. 536 с.
11. Красова О. О., Павленко А. О. Територіальна диференціація рослинного покриву старовікових відвалів Кривбасу. *Екологічний вісник Криворіжжя*. 2022. Вип. 7. С. 44–59. <https://doi.org/10.31812/ecobulletinkrd.v7i.7655>.
12. Кучеровський В. В., Шоль Г. Н. Анотований список урбанofлори Кривого Рогу. Кривий Ріг: Видавничий дім, 2009. 71 с.
13. Лисогор Л. П. Рослинність перелогів Правобережного степового Придніпров'я (склад, структура флори та продуктивність угруповань): дис. канд. біол. наук: 03.00.05. Київ, 2015. 402 с.
14. Лисогор Л. П., Красова О. О., Коршиков І. І. Дендрофлора модельних залізрудних відвалів Криворіжжя: структурний аналіз, здатність до колонізації техногенних екотопів. *Автохтонні та інтродуковані рослини*. 2017, вип. 13. С. 36–44.
15. Магдійчук А. П. Екологічні особливості сукцесії фітоценозів піщаних кар'єрів Правобережного Лісостепу: дис. на здобуття наукового ступеня доктора філософії. екологія. Київ, 2023.
16. Маленко Я. В. Особливості таксономічного та екологічного складу рослинних угруповань відвалів південно-західної зони Кривбасу: дис. канд. біол. наук: 03.00.16. Дніпропетровськ, 2001. 357 с.
17. Маленко Я. В., Кобрюшко О. О., Верба Д. Д. Особливості екоморфічного складу угруповань рослин техногенних екотопів відвалів Кривбасу. *Екологічні науки*, 2024, 2(53). С. 134–149. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.2-53.19>
18. Маленко Я. В., Кобрюшко О. О., Верба Д. Д. Спектри екоморфічної смності таксонів рослинних угруповань техногенних екотопів відвалів Кривбасу. *Біологія та екологія*. 2024, том 10, № 1. С. 84–94. <https://doi.org/10.33989/2024.10.1.306020>
19. Міськова О. В. Флора Регіонального ландшафтного парку «Сеймський»: дис. канд. біол. наук: 03.00.05. Київ, 2023. 288 с.
20. Мойсієнко І. І. Флора Північного Причорномор'я (структурний аналіз, синантропізація, охорона): автореф. дис. ... докт. біол. наук. 03.00.05. Київ, 2011. 35 с.
21. Панова С. М., Смірнова Г. Я. Аналіз умов експлуатації залізрудних родовищ Кривбасу та оцінка їх впливу на порушення природного середовища. *Геолого-мінералогічний вісник Криворізького національного університету*, 2025, том 27, № 1(53). С. 136–143. <https://doi.org/10.31721/2306-5443-2025-27-1-136-143>
22. Сафонова Г. С., Рева С. В. Заселення вищими рослинами залізрудних відвалів Кривбасу. *Вісник Дніпропетровського університету. Біологія. Екологія*. 2009. Вип. 17, т. 2. С. 87–94.
23. Сметана М. Г., Михайленко І. Л., Ярошук Ю. В. До уточнення флористичного аналізу рослинності ландшафтного заказника місцевого значення «Візерка». *Питання біоіндикації та екології*. Запоріжжя: ЗНУ, 2009. Вип. 14, № 1. С. 3–11.
24. Тарасов В. В. Флора Дніпропетровської та Запорізької областей. Видання друге. Доповнене та виправлене. Дніпропетровськ: Ліра, 2012. 296 с.
25. Федорончук М. М. Родина *Caryophyllaceae* Juss. у флорі України: систематика, географія, історія розвитку: автореф. дис. докт. біол. наук: 03.00.05. Київ, 2006. 43 с.
26. Фізична географія Криворіжжя / В. Л. Казаков та ін. Кривий Ріг: ТОВ «Центр-Припринт», 2012. 263 с.
27. Фітомеліоративна роль рослинного покриву у відтворенні девастованих земель в межах сірчаних розробок Західного Лісостепу: монографія / М. Л. Копій та ін. Рівне: НУВГП, 2019. 230 с.
28. Флора УРСР: в 12 т. Т. 1–12. К.: Видавництво АН УРСР, 1936–1965.
29. Хлизіна Н. В. Літофільні угруповання Криворізького залізрудного басейну: екологія, типологія, динаміка: автореф. дис. канд. біол. наук: 03.00.16. Дніпропетровськ, 2004. 20 с.
30. Хлизіна Н. В. Літофільні сукцесії в скельних екотопах відвалів гірничозбагачувальних комбінатів Кривбасу. *Ґрунтознавство*, 2007. Т. 8, № 3–4. С. 57–65.
31. Шоль Г. Н. Флора великого промислового міста – Кривого Рогу. В кн.: Рослини в урботехногенному середовищі степової зони України / Чипиляк Т. Ф., Зубровська О. М., Шоль Г. Н. К.: Талком, 2022. С. 13–98.
32. Ярков С. В. Розвиток мішаних за субстратом 20–40-річних відвальних ландшафтів Криворіжжя. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного ун-ту. Серія: Географія*. 2013. № 2. С. 23–30.
33. Biogeology and hemeroby of flora species in the Northern Steppe Dnipro Region / В. А. Baranovski et al. *Biosystems Diversity*, 2023, 31(4): 548–577. <https://doi.org/10.15421/012365>
34. Plant of the World online, 2025. <https://powo.science.kew.org/>
35. Semak U. Y., Mylenka M. M. Herbaceous plants as heavy metals accumulators in conditions of ash and slag dumps. *Acta Biologica Ukrainica*. 2024. No 1, 13–20. <https://doi.org/10.26661/2410-0943-2024-1-02>

Дата першого надходження статті до видання: 19.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026

## ДОСЛІДЖЕННЯ КІЛЬКІСНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ БІОКОРОЗІЙНИХ ПРОЦЕСІВ НА ПОВЕРХНІ НАФТОПРОВОДІВ

Степовий Є.Б.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
пр. Першотравневий, 24, 36011, м. Полтава  
[alenastepovaja@gmail.com](mailto:alenastepovaja@gmail.com)

Промисловий трубопровідний транспорт є важливою частиною видобування та переробки нафти. Проте, на будь-якому етапі транспортування нафти існує значна ймовірність забруднення компонентів довкілля нафтопродуктами через розгерметизацію ділянок нафтопроводів, що призводить до колосальних втрат сировини та значного негативного впливу на довкілля. Однією з поширених причин порушення герметичності ділянок нафтопроводів є корозійні процеси. Магістральні нафтопроводи переважно експлуатуються підземно, у середовищі ґрунту, де присутні мікроорганізми, біологічна активність яких сприяє розвитку біологічної корозії. Для захисту зовнішньої поверхні нафтопроводів використовують ізоляційне покриття, яке під час тривалої експлуатації може зазнавати пошкодження та утворення тріщин на поверхні. На підземних трубопроводах у місцях порушення ізоляційного покриття відбуваються суттєві зміни анодних і катодних поляризаційних характеристик сталі, що, у свою чергу, призводить до зміни електродних потенціалів металу на цих ділянках. З урахуванням наявності ґрунтових мікроорганізмів, які беруть участь у реакціях, що змінюють електрохімічні умови на поверхні сталі та сприяють утворенню агресивних метаболітів, формується сприятливе середовище для розвитку біоелектрохімічної корозії. Біологічна активність цих мікроорганізмів зумовлює перебіг мікробіологічних процесів, унаслідок яких змінюються електрохімічні параметри металеві поверхні, що, своєю чергою, призводить до прискорення процесів руйнування сталі.

Оскільки експлуатація нафтопроводу з дефектами ізоляції безпосередньо пов'язана з інтенсифікацією біоелектрохімічної корозії металу, під час обстеження трубопроводу особливу увагу необхідно приділяти визначенню характеристик корозійного процесу. Струм, що виникає в таких гальванічних парах, є універсальним показником для оцінювання швидкості біокорозії та розрахунку втрат металу, зокрема у тріщинах ізоляційного покриття.

Біологічна корозія нафтопроводів є одним з найбільш небезпечних видів корозії, яку спричиняють бактерії, що утворюють біоплівки на поверхні труби та призводять до їх біопшкодження та розгерметизації.

Одним із напрямів забезпечення екологічної надійності експлуатації нафтопроводів є врахування факторів, що впливають та оцінюють біокорозійні процеси на поверхні нафтопроводу. В роботі досліджено кількісну характеристику біокорозійних процесів модельних ділянок сталевих нафтопроводу за умов впливу біокорозійного середовища. Змодельовано процес біоелектрохімічної корозії сталевих пластин в лабораторних умовах та експериментально визначено швидкості біокорозії сталевих пластин. Доведено, що торф'яні ґрунти мають найвищу біокорозійну активність за швидкості корозії.

Змодельовані процеси покладено в основу розрахунку глибини біокорозійного ураження конструкції, що дозволяє прогнозувати розвиток зовнішніх корозійних процесів сталевих нафтопроводів з часом та вчасно запобігати забрудненню довкілля.  
*Ключові слова:* екологічна безпека, біологічна корозія, мікроорганізми, швидкість біокорозії.

### Investigation of the quantitative characteristics of biocorrosion processes on the surface of oil pipelines. Stepovi Ye.

Industrial pipeline transport is an important part of oil production and processing. However, at any stage of oil transportation, there is a significant probability of contamination of environmental components with petroleum products due to depressurization of oil pipeline sections, which leads to enormous losses of raw materials and a significant negative impact on the environment. One of the common causes of violation of the tightness of oil pipeline sections is corrosion processes. Main oil pipelines are mainly operated underground, in the soil environment, where microorganisms are present, the biological activity of which contributes to the development of biological corrosion. To protect the outer surface of oil pipelines, an insulating coating is used, which during prolonged operation may be damaged and cracks may form on the surface. On underground pipelines, in places where the insulating coating is broken, significant changes occur in the anodic and cathodic polarization characteristics of the steel, which, in turn, leads to a change in the electrode potentials of the metal in these areas. Given the presence of soil microorganisms that participate in reactions that change the electrochemical conditions on the steel surface and contribute to the formation of aggressive metabolites, a favorable environment is formed for the development of bioelectrochemical corrosion. The biological activity of these microorganisms determines the course of microbiological processes, as a result of which the electrochemical parameters of the metal surface change, which, in turn, leads to the acceleration of steel destruction processes.

Since the operation of an oil pipeline with insulation defects is directly related to the intensification of bioelectrochemical corrosion of the metal, during the inspection of the pipeline, special attention must be paid to determining the characteristics of the corrosion process. The current that arises in such galvanic pairs is a universal indicator for assessing the rate of biocorrosion and calculating metal losses, in particular in cracks in the insulating coating.



Biological corrosion of oil pipelines is one of the most dangerous types of corrosion caused by bacteria that form biofilms on the surface of the pipe and lead to their biodamage, depressurization and the occurrence of emergency situations.

To prevent environmental pollution during the operation of oil pipelines, it is necessary to assess the operating conditions of the structure and consider the regularities and mechanisms of biocorrosion processes on the surface of the pipes to assess reliability and trouble-free operation.

One of the ways to increase the environmental safety of the operation of oil pipelines is to consider factors that characterize biocorrosion processes on the metal of the pipeline. The work investigated the quantitative characteristics of biocorrosion processes of model sections of a steel oil pipeline under the influence of a biocorrosion environment. The process of bioelectrochemical corrosion of steel plates was modeled in laboratory conditions and the rates of biocorrosion of steel plates were experimentally determined. It was proven that peat soils have the greatest biocorrosion activity relative to St20 steel in terms of corrosion rate.

The simulated processes are used as the basis for calculating the depth of biocorrosion damage to the structure, which allows predicting the development of external corrosion processes of steel oil pipelines over time and preventing environmental pollution in a timely manner. *Key words:* environmental safety, biological corrosion, microorganisms, biocorrosion rate.

**Постановка проблеми.** Враховуючи підземні умови експлуатації магістральних нафтопроводів вони можуть підлягати впливу ґрунтової корозії, яка значною мірою визначається ґрунтовою біокорозією. Мережа нафтотранспортної системи України, зокрема і Полтавської області є достатньо розгалуженою, а ґрунти, в яких вони пролягають – надзвичайно різноманітними за своїм складом, типом, рН й іншими властивостями. Тому, аналіз й оцінювання біокорозійних характеристик ґрунтів є доречним. До того ж, узагальнених праць з цього питання, зокрема для Полтавської області, не існує, а їх наявність в комплексі з іншими дослідженнями дасть змогу оцінити вплив біологічної корозії за кількісною характеристикою корозійного процесу, а саме щільністю струму, що дозволить запобігти виникненню нештатних ситуацій, пов'язаних з розгерметизацією нафтопроводів.

Універсальною кількісною характеристикою корозійного процесу є струм корозії  $I$ , А або щільність струму  $i$ , А/см<sup>2</sup>. Тому метою роботи стало встановлення та дослідження струмових показників біокорозійних процесів на зовнішній поверхні нафтопроводів за умов впливу біокорозійного середовища.

**Актуальність дослідження.** Оскільки магістральні нафтопроводи експлуатуються в складних та неоднорідних ґрунтових умовах, де спостерігаються зміни вологості, кислотності, мікробіологічного складу та вмісту агресивних домішок, виникнення корозійних процесів є практично неминучим. Основним механізмом такої корозії, як правило, виступає електрохімічна взаємодія між матеріалом трубопроводу та агресивними компонентами навколишнього середовища.

У зв'язку з цим особливою актуальністю набуває дослідження корозійних процесів, що виникають на зовнішній поверхні нафтопроводів. Ретельний аналіз факторів, що впливають на розвиток корозії, а також вивчення її природи дозволяють розробляти ефективні методи профілактики та захисту. Своєчасне виявлення ознак корозійного ураження, його оцінка та усунення є критично важливими для забезпечення надійної та екологічно безпечної експлуатації магістральних нафтопроводів. Це, у свою чергу, дозво-

ляє запобігати витокам нафти, зменшити техногенне навантаження на довкілля та підвищити загальну ефективність роботи трубопровідного транспорту.

**Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.** Дане дослідження здійснено в рамках пріоритетних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок України у сфері раціонального природокористування. Авторська робота спрямована на вирішення актуальних завдань щодо сталого використання природних ресурсів, охорони навколишнього середовища та забезпечення екологічної безпеки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Процес корозії нафтопроводів залежить не тільки від ґрунтових умов, але й від сорту сталі, якості і матеріалу зварних з'єднань, товщини стінки трубопроводів, якості захисного покриття, а також від умов експлуатації трубопроводу [1, 2].

На протікання корозійних процесів впливає чимало факторів, важливість яких не можна недооцінювати. Причинами розвитку корозійних процесів у підземному середовищі є неоднорідність сольового складу та кислотності ґрунтів, порушення на окремих ділянках суцільності ізоляційного покриття, неоднакова вологість ґрунтів. Характер і кількість водорозчинних солей у ґрунті визначають його корозійну активність.

Проте в ґрунтовому середовищі є всі умови для існування різноманітних мікроорганізмів. Життєдіяльність деяких мікроорганізмів сприяє розвитку та протіканню корозійних процесів на зовнішній поверхні нафтопроводів, тобто розвитку біокорозії [3, 4].

Аналіз сучасних науково-технічних розробок у сфері впливу аварійних витоків нафтопродуктів на навколишнє середовище засвідчив, що одним із ризиків є зовнішня біокорозія сталевих нафтопроводів. Такі процеси можуть призводити до розгерметизації трубопроводів і спричиняти аварійні ситуації. Такі події, у свою чергу, зумовлюють значні екологічні втрати, включно з витокем нафтопродуктів і серйозним забрудненням компонентів довкілля [5 – 10]. В попередніх дослідженнях ґрунтів Полтавської області експериментально підтверджено наявність умов для розвитку біокорозійних

процесів за індикаторами рН, наявність сульфатів та вологість ґрунту [11].

З мікроорганізмів, що беруть участь у процесах корозії, велику роль відіграють сульфатовідновлюючі бактерії типу *Sporovibrio desulfuricans* (найбільш поширені у природі), тіосульфатоокиснюючі типу *Thiobacillus thioararus*, сіркобактерії типу *Thiobacillus thiooxidans*, залізоспоживаючі типу *Gallionella ferruginea*, водозв'язуючі типу *Hydrogenomonas flava*, залізні бактерії типу *Crenothrix* і *Leptothrix* і нітратовідновлюючі типу *Thiobacillus denitrificans* [12].

Ступінь небезпеки біокорозії встановлюють бактеріологічним аналізом зразків ґрунту, який дозволяє виявити перераховані вище мікроорганізми [6, 7, 13]. Отже, наявність та активну життєдіяльність мікроорганізмів, що активують корозійні процеси на зовнішній поверхні труби можна оцінити, здійснивши моніторинг показників-індикаторів зазначених мікроорганізмів.

Науковцями доведено, що мікроорганізми можуть брати участь у корозійних процесах, шляхом використання іонів конструкційних матеріалів для своєї життєдіяльності [13]. Найчастіше мікробіологічна корозія викликає розвиток локальних видів електрохімічної корозії. Першість серед мікроорганізмів, що спричиняють руйнування обладнання на нафтопромислах по праву займають СВБ, які представлені наступними родами: *Desulfomonas*, *Desulforomonas*, *Desulfovibrio* і *Desulfotomaculum*, які піддають біологічній корозії багато конструкційних матеріалів, в тому числі сталь.

Однією з перших моделей, які описують руйнування металу під впливом навколишнього агресивного середовища, є закони Фарадея. Існують й інші математичні моделі руйнування металу трубопроводів під дією оточуючого середовища інших авторів і вчених, але усі вони є в дечому подібними і схожими. Це виявляється в тому, що у залежності моделей входять багато різних поправкових коефіцієнтів, які враховують вплив лише деяких факторів навколишнього середовища та є справедливими лише для трубопроводів, які не зазнають локального агресивного впливу. Тож наведені моделі не дають змогу з достатньою точністю описати процеси електрохімічної корозії нафтопроводів.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** Чисельні дослідження щодо поведінки сталі при біоелектрохімічній корозії описані в багатьох працях, але при дослідженнях не враховано реальних умов експлуатації конструкцій. Отже, необхідність розробки залежностей, які б враховували впливи навколишнього середовища, в тому числі і локальні, особливості експлуатації нафтопроводів та інші можливі фактори, не втрачає своєї актуальності.

**Новизна.** За результатами проведених досліджень встановлено кількісні характеристики біоко-

розії сталі в ґрунтових умовах Полтавської області. Змодельовано процес біоелектрохімічної корозії сталевих пластин і експериментально визначено швидкість їх біокорозійного руйнування. Дослідження підтвердили, що торф'яні ґрунти виявляють найвищу біокорозійну активність щодо сталі Ст20 за показником швидкості корозії. Отримані результати моделювання стали основою для розрахунку глибини біокорозійного ураження конструкцій, що дає змогу прогнозувати динаміку зовнішніх біокорозійних процесів у сталевих нафтопроводах та своєчасно вживати заходів для запобігання забрудненню навколишнього середовища.

**Методологічне або загальнонаукове значення.** Результати наукового дослідження в комплексі з іншими дослідженнями дадуть змогу визначити потенційні екологічні ризики при експлуатації споруд нафтової галузі, що дасть можливість розробити заходи із запобігання виникнення шкідливих впливів при розгерметизації нафтопроводів, раціонально планувати ремонтні роботи, прогнозувати реальні строки роботи.

**Викладення основного матеріалу.** Для оцінювання швидкості біокорозійного руйнування металу використовують кількісні показники корозії, до яких відносять: масовий показник корозії  $K_m$ ; глибинний показник корозії; об'ємний показник швидкості корозії  $K_{об}$  та струмовий показник швидкості корозії  $i$ .

Для визначення впливу типу ґрунту на інтенсивність біокорозії сталі у дослідженні застосовано гравіметричний метод. Було відібрано ґрунтові зразки трьох типів, характерних для Полтавської області: чорнозем, глину та торф. Ґрунтові грудки подрібнювали у порцеляновій ступці за допомогою товкачика з гумовим наконечником.

Від кожного типу ґрунту відважували по 100 грамів повітряно-сухої, ретельно подрібненої маси на лабораторних вагах, після чого до кожної проби додавали по 20 мл дистильованої води. Експеримент проходив у два етапи: дослідження в звичайному ґрунтовому середовищі та в біологічно активному.

Для першого етапу було підготовлено 10 сталевих зразків у формі прямокутних пластин товщиною 3 мм. Перед експериментом зразки очищали від іржі та сторонніх нашарувань: шліфували і полірували дрібнозернистим абразивом до досягнення рівної поверхні, а знежирення виконували етанолом. Далі кожен зразок зважували на аналітичних вагах з точністю  $\pm 0,0001$  г і поміщали в підготовлене корозійне середовище.

Після завершення експерименту зразки вилучали з ґрунту, промивали та очищували від корозійних продуктів гумкою, а за потреби – обробляли 0,5% розчином сірчаної кислоти з додаванням уротропіну. При візуальному огляді на деяких зразках були виявлені сліди корозійного ураження. Очищені зразки висушували та повторно зважували. Швидкість корозійного процесу визначали за втратою маси зразків

певної площі за встановлений період дії середовища.

Результати досліджень наведено в таблиці 1.1 та на діаграмах 1.1 – 1.2.

Другий етап досліджень проводили аналогічно, але в підготовленому біокорозійному середовищі. Біокорозійне середовище формували шляхом додавання до підготовленого ґрунту бактеріально розкладених яєць, вітаміну В та води. Яйця виступали живильним середовищем для розвитку мікроорганізмів, зокрема сіркобактерій. У результаті їхньої життєдіяльності відбувався розпад білкових сполук із подальшим утворенням сірководню, що визначався за характерним запахом. Зразки сталевих пластин перебували у контакті з таким біологічно активним ґрунтовим середовищем протягом трьох місяців. Протягом усього періоду дослідження щотижня здійснювали відбір ґрунтових проб з метою контролю рівня рН і вмісту сульфатів. Результати досліджень наведено в таблиці 1.2.

При експериментальному дослідженні відбувався контроль рН та наявності сульфатів. Замічено, що з часом значення рН у всіх пробах зростало, а кількість сульфатів зменшувалась.

За результатами експериментальних досліджень встановлено, що зволожені торф'яні ґрунти з біо-

логічним забрудненням проявляють найвищу корозійну агресивність щодо сталі Ст20, що підтверджується значеннями швидкості біокорозії. Виявлено також, що в таких ґрунтових умовах інтенсивність корозійного руйнування сталі істотно перевищує показники загальної ґрунтової корозії.

**Висновки.** В результаті проведення наукових досліджень та розв'язанні поставлених завдань зроблені наступні висновки:

За результатами аналізу сучасного стану науково-технічних досягнень з питань шкідливого впливу на довкілля внаслідок аварійних витоків, виявлено, що одним із небезпечних чинників є зовнішні біокорозійні процеси з наступною розгерметизацією сталевих нафтопроводів і виникненням аварійних ситуацій. Наслідками зазначеного є значні екологічні збитки, пов'язані з втратою нафтопродуктів та суттєвими забрудненнями компонентів довкілля.

За результатами аналізу науково-технічної літератури встановлено основні індикатори активної життєдіяльності ґрунтових мікроорганізмів, які сприяють біокорозійним процесам.

Змодельовано процес біоелектрохімічної корозії сталевих пластин в лабораторних умовах та експериментально визначено швидкості біокорозії сталевих

Таблиця 1

Результати розрахунків швидкості корозії сталі в ґрунтах в вагових показниках  $K_{\text{ваг}}$ , глибинних показниках,  $K_z$ , та струмовому показнику  $i$  (II етап)

$g_0$ , г вага до корозії	$g_1$ , г вага після корозії	Тип ґрунту	Вологість ґрунту	$K_{\text{ваг}}$ , г/см <sup>2</sup> рік	$K_z$ , мм/рік	$i$ , А/см <sup>2</sup>
43,06255	42,8643	Торф	сухий	7,44718 E-06	7,42599 E-06	7,25762 E-10
11,14025	11,0324	Чорнозем	сухий	7,25383 E-06	7,23319 E-06	7,06919 E-10
28,4043	28,2716	Глина	сухий	7,91509 E-06	7,89257 E-06	7,71362 E-10
44,23605	43,78045	Торф	вологий	1,81166 E-05	1,80651 E-05	1,76555 E-09
16,85685	16,7014	Чорнозем	вологий	9,56281 E-06	9,5356 E-06	9,31939 E-10
29,51645	29,27305	Глина	вологий	1,91051 E-05	1,20707 E-05	1,1797 E-09

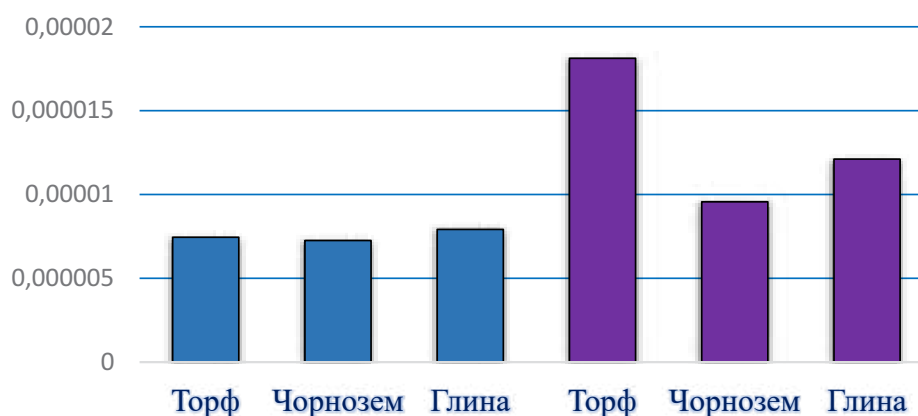


Рис. 1. Діаграма залежності швидкості корозії сталі Ст2 в масовому показнику від типу та вологості ґрунту

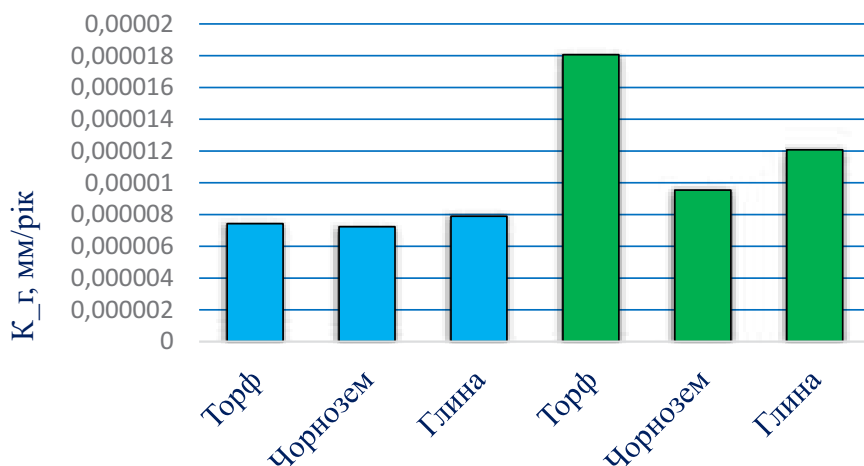


Рис. 2. Діаграма залежності швидкості корозії сталі Ст2 в глибинному показнику від типу та вологості ґрунту

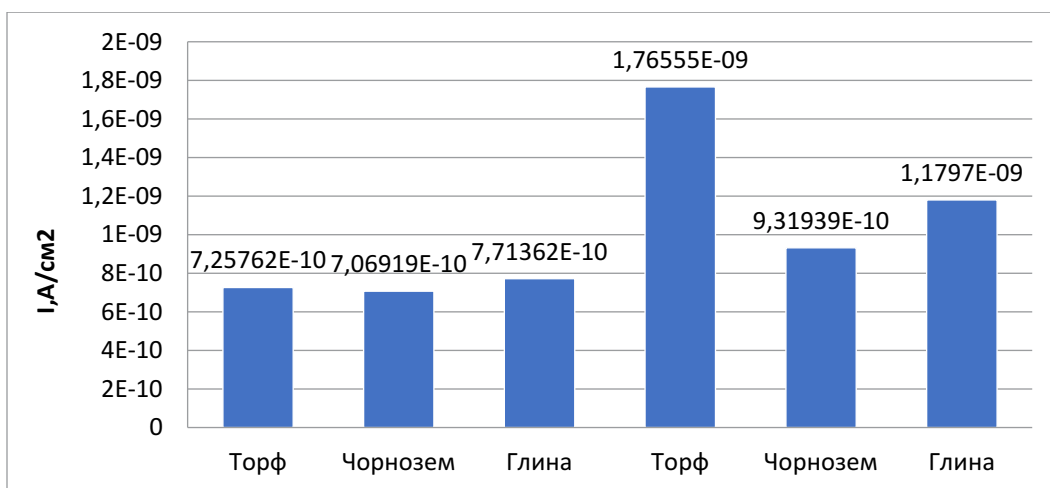


Рис. 3. Діаграма залежності швидкості корозії сталі Ст2 в струмовому показнику від типу та вологості ґрунту

Таблиця 2

**Результати розрахунків швидкості корозії сталі в ґрунтах в вагових показниках  $K_{ваг}$ , глибинних показниках,  $K_g$ , та струмовому показнику  $I$  (III етап)**

$g_0$ , Г вага до корозії	$g_1$ , Г вага після корозії	Тип ґрунту	$K_{ваг}$ , г/см <sup>2</sup> рік	$K_g$ , мм/рік	$i$ , А/см <sup>2</sup>
28,0960	26,2200	Торф	0,2777	0,309	0,000026
11,9200	11,10	Чорнозем	0,258	0,28	0.00002407
16,5964	16,52	Глина	0.0467	0.052	0.00000448

пластин. Доведено, що торф'яні ґрунти мають найбільшу біокорозійну активність відносно сталі Ст20 за показником швидкість корозії.

Змодельовані процеси покладено в основу розрахунку глибини біокорозійного ураження конструкції, що дозволяє прогнозувати розвиток зовнішніх корозійних процесів сталевих нафтопроводів з часом та вчасно запобігати забрудненню довкілля.

**Перспективи використання результатів дослідження.** Отримані результати дозволяють більш достовірно оцінити умови експлуатації нафтопроводів в ґрунтах Полтавської області, що дозволяє прогнозувати реальні строки роботи конструкції, переглянути режим експлуатації зменшити екологічні ризики через недопущення аварійних розливів нафти.

## Література

1. Алімов В.І., Дурягіна З.А. Корозія та захист металів від корозії. Донецьк-Львів: ТОВ «Східний видавничий дім», 2012. 328 с.
2. Сопрунюк П. М., Юзевич В. М. Діагностика матеріалів і середовищ. Енергетичні характеристики поверхневих шарів. Львів : ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, Вид-во «Сполом», 2005. 292 с.
3. Андреюк К. І., Козлова І. П., Коптева Ж. П. Мікробна корозія підземних споруд. Київ: Наук. думка, 2005. 259 с.
4. Приходько С.В., Курмакова І.М., Третяк О.П. Бактерії-деструктори як чинник біопшкодження підземних металевих конструкцій. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Біологія*. Випуск 20. 2007. С. 253 – 256.
5. Полутренко М.С. Екологічний аудит корозійної активності ґрунтів прокладання магістральних газопроводів. *Науково-технічний журнал* № 2. (10). 2014. 63 – 69.
6. Степова О. В., Бондар О. В., Куш О. Ю., Степовий Д. Є. Дослідження біокорозійних процесів у ґрунтовому середовищі. *Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах неаживичайних ситуацій*: зб. матеріалів І Міжнар. наук.-практ. конф. Полтава: НУПП. 2022. С. 561-563
7. Степова О.В., Бондар О.В., Степовий Д. Врахування умов експлуатації нафтопроводів щодо оцінки біокорозійних процесів. *Регіональні проблеми охорони довкілля та збалансованого природокористування*. Матеріали Міжнар. наук. конф., 21-22 вересня 2022. Одеса: ОДЕКУ. 2022. С. 26-30
8. Степова О.В., Галькевич В.І., Гудзь Я.Р. Аналіз стану корозійної безпеки газопроводів в Полтавській області. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. Полтава. 2013. № 2. С. 132 – 135
9. Степова О.В. Врахування корозійних процесів сталевих нафтопроводів з метою підвищення екологічної безпеки. *Екологічні науки: науково-практичний журнал* / Головний редактор О.І. Бондар. К.: ДЕА. 2018. №(1)20. Т.2. С. 15 – 21.
10. Степова О.В. Районування території Полтавської області за показниками корозійної агресивності ґрунтів. *Екологічні науки: науково-практичний журнал* / Головний редактор О.І. Бондар. К.: ДЕА. 2018. №(3)22. С. 106 – 112.
11. Степова О.В., Степовий Є.Б. Біокорозійна активність ґрунтів Полтавської області *Екологічна безпека та технології захисту довкілля*. Головний редактор О.І. Бондар. К.: ДЕА, 2023. №.4 С. 3-10
12. Крикунов В.Г. Лабораторний практикум по ґрунтознавству: навч. посіб. Біла Церква, 2003. 83 с.
13. Полутренко М.С. Екологічний аудит корозійної активності ґрунтів прокладання магістральних газопроводів. *Науково-технічний журнал* № 2. (10). 2014. 63–69.

Дата першого надходження статті до видання: 12.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026

## ВПЛИВ ЕКОЛОГІЧНИХ ЧИННИКІВ НА ЛІСОВІ ЕКОСИСТЕМИ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОСИСТЕМНИХ ПОСЛУГ

Мельник-Шамрай В.В., Іванюк Р.О.

Державний університет «Житомирська політехніка»  
вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир  
[org\\_vvm@ztu.edu.ua](mailto:org_vvm@ztu.edu.ua)

У статті проаналізовано вплив екологічних чинників на стан і розвиток лісових екосистем та їхню здатність забезпечувати екосистемні послуги на прикладі Українського Полісся. Актуальність дослідження зумовлена посиленням кліматичних змін, деградацією лісів, зростанням антропогенного навантаження та наслідками воєнних дій, що призводять до порушення екологічної рівноваги та зниження функціональної стійкості лісових екосистем.

Результати дослідження показали, що поєднання кліматичних змін, деградації ґрунтів, осушення торфовищ, поширення шкідників і збільшення кількості лісових пожеж негативно впливає на стан лісових екосистем Українського Полісся та знижує їхню здатність надавати екосистемні послуги. Підвищення середньорічної температури повітря і зміни режиму опадів призводять до водного стресу деревних порід, зменшення приросту біомаси та скорочення можливостей лісів накопичувати вуглець. У межах дослідження застосовано SWOT-аналіз як інструмент узагальненої оцінки впливу екологічних чинників на екосистемні послуги лісових екосистем. Проведений аналіз дозволив визначити сильні та слабкі сторони функціонування лісів Полісся, а також основні можливості й загрози, пов'язані зі зміною клімату, антропогенним навантаженням і деградаційними процесами. Результати SWOT-аналізу використано для обґрунтування пріоритетних напрямів збереження та підтримання екосистемних послуг, а також для формування практичних рекомендацій щодо сталого управління лісовими ресурсами регіону. Отримані результати можуть бути використані в практиці лісового господарства для покращення управління лісами, проведення екологічного моніторингу та планування заходів із збереження і відновлення лісових екосистем в умовах змін клімату. *Ключові слова:* лісові екосистеми, екосистемні послуги, біорізноманіття, екологічні чинники, вплив кліматичних змін, викиди CO<sub>2</sub>.

### **Influence of environmental factors on forest ecosystems and ecosystem services. Melnyk-Shamrai V., Ivaniuk R.**

The article analyzes the impact of environmental factors on the condition and development of forest ecosystems and their ability to provide ecosystem services, using the Ukrainian Polissia as a case study. The relevance of the study is determined by the intensification of climate change, forest degradation, increasing anthropogenic pressure, and the consequences of military activities, which lead to the disruption of ecological balance and a decline in the functional stability of forest ecosystems. The results of the study show that the combined effects of climate change, soil degradation, peatland drainage, the spread of pests, and an increase in forest fires negatively affect forest ecosystems in Ukrainian Polissia and reduce their capacity to provide ecosystem services. Rising mean annual air temperatures and changes in precipitation patterns cause water stress in tree species, reduce biomass growth, and limit the ability of forests to sequester carbon. A SWOT analysis was applied as a tool for an integrated assessment of the impact of environmental factors on forest ecosystem services. The analysis made it possible to identify the strengths and weaknesses of forest functioning in Polissia, as well as the main opportunities and threats associated with climate change, anthropogenic pressure, and degradation processes. The results of the SWOT analysis were used to substantiate priority directions for the conservation and maintenance of ecosystem services and to develop practical recommendations for sustainable forest management in the region. The findings of the study can be applied in forestry practice to improve forest management, conduct environmental monitoring, and plan measures for the conservation and restoration of forest ecosystems under climate change conditions. *Key words:* forest ecosystems, ecosystem services, biodiversity, environmental drivers, climate change impacts, CO<sub>2</sub> emissions.

**Постановка проблеми.** Ліси займають третину всієї суші нашої планети. Вони виконують ряд важливих функцій: екологічних, кліматорегулювальних, водоохоронних, ґрунтозахисних, санітарно-гігієнічних та соціально-економічних, які забезпечують стабільність біосфери. Крім того, лісові екосистеми є однією з найважливіших складових природного середовища, що забезпечують реалізацію багатьох

екосистемних послуг – від підтримання кліматичного балансу до збереження біорізноманіття та соціальних благ для населення. У сучасних умовах зміни клімату, зростання антропогенного навантаження та деградаційних процесів в екосистемах особливої актуальності набуває проблема дослідження впливу екологічних чинників на функціонування лісів, їхню стійкість та відтворювальну здатність. У зв'язку



з цим виникає потреба у вивченні впливу екологічних чинників на лісові екосистеми та їхню здатність забезпечувати екосистемні послуги, оцінюванні ролі лісів у процесах адаптації до змін клімату, зменшенні негативних наслідків антропогенного навантаження, а також формуванні науково-обґрунтованих підходів до сталого лісокористування й управління лісовими екосистемами.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Упродовж останніх років зростає науковий інтерес до вивчення впливу екологічних чинників на функціонування лісових екосистем та їхню здатність забезпечувати екосистемні послуги. Сучасні дослідження підтверджують, що кліматичні зміни, трансформація землекористування, антропогенне навантаження та біотичні фактори суттєво впливають на структуру, продуктивність і стійкість лісів. У роботі [1, 2] лісові екосистеми розглядаються як ключові постачальники екосистемних послуг, що забезпечують регулювання клімату, підтримку водного балансу, збереження біорізноманіття та соціально-економічний добробут населення. Водночас авторами встановлено, що функціонування лісових екосистем істотно залежить від дії екологічних чинників, зокрема кліматичних змін, антропогенного навантаження та трансформації землекористування.

Дослідники [3-5], вказують на значний вплив клімату на формування екосистемних послуг. Так, за результатами їх досліджень встановлено, що підвищення середньорічних температур і зміни режиму опадів призводять до зменшення регульованих послуг, таких як накопичення вуглецю, регулювання водного балансу та захист ґрунтів від ерозії. Кліматичний стрес знижує продуктивність лісів, сприяє поширенню шкідників і підвищує ризик масштабних пожеж, що негативно відображається на екосистемній стійкості.

Дослідники відмічають [6], що видовий склад, вікова структура, просторове розміщення дерев і рівень біорізноманіття безпосередньо впливають на здатність лісів забезпечувати екосистемні послуги. Багаторусні та різновікові насадження демонструють вищу екологічну стабільність і більшу ефективність у виконанні кліматорегульованих та ґрунтозахисних функцій.

Регіональні дослідження підтверджують, що локальні природні умови та особливості господарської діяльності відіграють вирішальну роль у формуванні екосистемних послуг. Для лісів України встановлено, що осушення торфовищ, деградація ґрунтів і фрагментація лісових масивів негативно впливають на водорегульовані та кліматорегульовані функції [7, 9], а в роботі [8] відмічено, що лісові масиви, на території яких є заповідні об'єкти, створюють сприятливі умови для забезпечення ключових екосистемних послуг та сприяють збереженню біологічного різноманіття.

Зокрема, у міських лісових масивах Києва встановлено порушення водного балансу, ерозію ґрунтів і втрату культурних та рекреаційних послуг через урбанізацію та інтенсивне рекреаційне навантаження [10]. Ліси Полісся демонструють негативні наслідки масштабних суцільних рубок, пожеж і зміни клімату, що знижує екологічну цінність та продуктивність лісових екосистем [11]. Масові пожежі під час війни 2022 року призвели до значних викидів вуглецю та порушення екологічних функцій лісів, зменшуючи їхню здатність надавати регульовані та забезпечувальні послуги [12].

Сучасні методи оцінювання екосистемних послуг дедалі частіше базуються на інтеграції ГІС, дистанційного зондування та економічних методів аналізу, що дозволяє враховувати регіональні особливості і планувати адаптаційні стратегії управління лісами [1, 13]. Таким чином, сучасні дослідження підтверджують комплексний вплив екологічних чинників на лісові екосистеми та підкреслюють необхідність впровадження інтегрованих стратегій для забезпечення стійкого постачання екосистемних послуг як на глобальному, так і на регіональному рівні.

**Метою статті** є вивчення впливів екологічних чинників на стан і розвиток лісових екосистем та виявлення напрямів збереження та підтримання їхніх екосистемних послуг. Об'єктом досліджень: лісові екосистеми Українського Полісся. Предмет досліджень – вивчення особливостей впливу екологічних чинників на стан, розвиток та здатність лісових екосистем забезпечувати екосистемні послуги.

**Новизна** отриманих результатів полягає в тому, що отримано комплексний аналіз впливу екологічних чинників на стан і розвиток лісових екосистем у межах Українського Полісся та розглянуті напрямки збереження та підтримання їхніх екосистемних послуг. Результати дослідження можуть бути використані лісогосподарськими підприємствами для розроблення стратегічних природоохоронних заходів, вдосконалення екологічно орієнтованого лісокористування, при проведенні екологічного моніторингу стану лісів і прогнозуванні змін екосистемних послуг та в освітньому процесі закладами вищої освіти під час викладання дисциплін екологічного та лісівничого спрямування.

**Методика досліджень.** Дослідження має оглядово-аналітичний характер і базується на комплексному використанні методів аналізу, узагальнення та систематизації наукової інформації щодо впливу екологічних чинників на лісові екосистеми та їхні екосистемні послуги. Інформаційну основу дослідження становили дані державної статистики, матеріали офіційних звітів з охорони навколишнього природного середовища, використання та відтворення лісових ресурсів України, а також результати попередніх наукових досліджень вітчизняних і зарубіжних авторів. У роботі застосовано методи порівняльного та структурно-функціонального аналізу для оцінки

впливу природних (кліматичних, ґрунтово-гідрологічних, біотичних) і антропогенних чинників на стан лісових екосистем та їхню здатність забезпечувати регульовальні, забезпечувальні, підтримувальні та культурні екосистемні послуги. Для інтегрованої оцінки впливу чинників використано SWOT-аналіз. Цей підхід дав змогу визначити сильні та слабкі сторони функціонування лісів, а також основні можливості й загрози. На основі результатів SWOT-аналізу сформульовано пріоритетні напрями збереження та підтримання екосистемних послуг. Узагальнення отриманих результатів стало підґрунтям для розроблення рекомендацій щодо сталого управління лісовими екосистемами в умовах зміни клімату.

**Виклад основного матеріалу.** Загальна площа лісового фонду України становить – 10,4 млн га, із яких вкритих лісовою рослинністю – 9,6 млн га. Ліси розташовані нерівномірно по всій території нашої країни, переважають здебільшого в Українських Карпатах та Поліссі [14]. Через те, що ліси знаходяться в різних природних зонах вони значно різняться між собою й не доходять до оптимального рівня (рис. 1.1), де формується стабільне розвинене екологічне середовище та при якому найбільш ефективно задіяні ресурси землі та найбільше проявляється цілісний комплекс лісових властивостей [14].

Українське Полісся є ключовою лісоутворюючою територією держави, на яку припадає близько 40 % загальної площі лісів. Водночас саме тут найбільш відчутно проявляються наслідки кліматичних коливань, радіаційного забруднення, осушувальної меліорації, пожеж і хвороб лісу. Саме тому, вивчення впливу екологічних чинників на лісові екосистеми та їхній внесок у надання екосистемних послуг в даному регіоні є актуальним.

Основу лісового покриву становлять соснові (*Pinus sylvestris* L.), березові (*Betula pendula* Roth.) та вільшнякові (*Alnus*) насадження, рідше трапляються дубові (*Quercus robur* L.) угруповання. Протягом останніх десятиліть лісові екосистеми регіону зазнають суттєвого антропогенного та кліматичного впливу. Внаслідок підвищення середньорічної температури на 1,2–1,5 °C за останні 30 років спостерігається зміщення меж оптимальних екологічних ніш деревних порід. Зростає частота посух, пожеж і масових уражень насаджень шкідниками, зокрема короїдом-типографом (*Ips typographus* L.), що призвело до втрати понад 30 тис. га лісів у Житомирській області у 2020–2023 рр [15, 16]. Крім того, лісові масиви Українського Полісся зазнають додаткового навантаження [8, 17, 18]: осушувальні меліорації, що призвели до деградації торфових ґрунтів, радіоактивне забруднення лісів, надмірна експлуатація лісових ресурсів без належного відновлення, зміни гідрологічного режиму та втрати біорізноманіття.

Екологічні чинники, що впливають на стан лісових екосистем, умовно поділяють на природні (абіотичні, біотичні) та антропогенні. Вони відіграють важливу роль у формуванні деревних насаджень та їх продуктивності. Вплив природних та антропогенних екологічних чинників є взаємопов'язаним та синергічним. Так, природні чинники визначають межі поширення, продуктивність і видовий склад лісів, тоді як антропогенні чинники формують сучасні тенденції деградації екосистем (табл. 1).

Наприклад, кліматичні чинники відповідають за ареал поширення лісоутворювальних порід, що пов'язано з формуванням світлового, теплового та водного режиму, які є важливими факторами для росту та розвитку деревних насаджень. Ґрунтово-

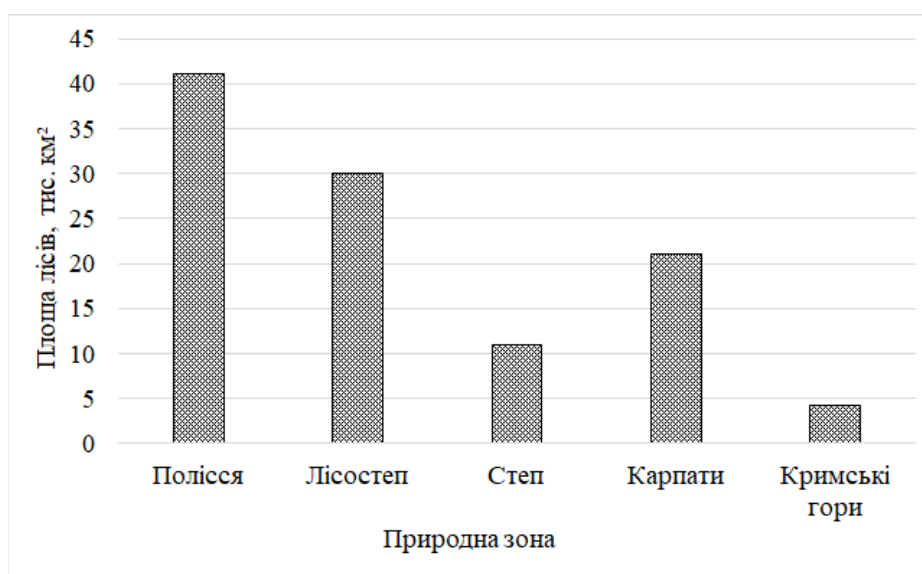


Рис. 1. Лісистість території України за природними зонами

Джерело: побудовано авторами на основі аналізу [14]

Таблиця 1

## Основні екологічні чинники, що впливають на стан лісових екосистем Полісся

Група чинників	Характер впливу	Наслідки для екосистеми
Кліматичні	Підвищення температури, зменшення кількості опадів у вегетаційний період	Зниження продуктивності, збільшення ризику пожеж
Ґрунтові	Осушення торфовищ, деградація дерново-підзолистих ґрунтів	Втрата вологи, зменшення біомаси
Гідрологічні	Зниження рівня ґрунтових вод, порушення стоку	Порушення водного балансу лісів
Біотичні	Масові ураження шкідниками, зміна видової структури	Смертність деревостанів, зниження біорізноманіття
Антропогенні	Суцільні рубки, рекреаційне навантаження, пожежі	Фрагментація лісів, деградація ґрунтів

Джерело: створено авторами на основі аналізу літератури

Таблиця 2

## Методи оцінки впливу екологічних чинників на стан лісових екосистем Полісся

Група методів	Сутність	Застосування в умовах Полісся
Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ)	Використання супутникових даних (Sentinel-2, Landsat, MODIS) для моніторингу змін покриття та стану лісів	Виявлення ділянок всихання, аналіз динаміки NDVI, NBR
ГІС-моделювання	Просторовий аналіз даних клімату, ґрунтів, рельєфу	Просторове моделювання ризиків деградації лісів
Біоіндикаційні методи	Використання фітосанітарного стану дерев, лишайників, ентомофауни як індикаторів	Оцінка якості повітря, кислотності ґрунтів
Лісотаксаційні обстеження	Польові вимірювання запасів, структури, приросту	Комплексна оцінка продуктивності та санітарного стану
Моделювання екосистемних процесів	Використання моделей (FORECAST, InVEST, LANDIS-II) для прогнозування динаміки	Прогноз змін екосистемних послуг під дією клімату
Лабораторні аналізи ґрунтів та води	Визначення рН, вмісту С, N, важких металів	Аналіз деградації едафотопів

Джерело: створено авторами на основі аналізу літератури

едафічні фактори визначають продуктивність лісових екосистем та обсяг виходу ділової деревини, адже саме від цих чинників одючість ґрунту, вміст органічних речовин, запас поживних елементів та водний режим. Негативним впливом біотичних чинників є масове розмноження шкідників та поширення інвазійних видів, що суттєво порушує структуру та стійкість лісових насаджень. Проте, антропогенні чинники все ж залишаються одним із ключових джерел впливу на лісові екосистеми. Інтенсивні вирубки, пожежі, рекреаційне навантаження, забруднення атмосфери знижує стійкість лісових екосистем та погіршує їхню здатність забезпечувати екосистемні послуги.

Сучасні наукові дослідження щодо вивчення впливу екологічних чинників на лісові екосистеми передбачають комплексний підхід, що поєднує польові, лабораторні, дистанційні та моделювальні методи (табл. 2).

Залежно від мети дослідження можуть використовуватися різні методи. Наприклад, при оцінці впливу посух на лісову продуктивність поєднуються дані NDVI-індексів із результатами польових обмірів запасів деревини, а для вивчення екосистемних

послуг використовують методи моделювання, які дозволяють кількісно оцінити вплив екологічних чинників на такі показники, як зв'язування вуглецю, водорегулююча функція, біорізноманіття, що стає важливим для екологічної політики України.

Екосистемні послуги лісів – це всі користі та вигоди, які суспільство може отримати від лісових екосистем. Вони поділяються на кілька основних категорій [19]: регулюючі (очищення повітря, регулювання клімату, захист від ерозії ґрунтів та інші); забезпечувальні (деревина, ягоди, гриби, дикі звірі, лікарські рослини); підтримуючі (збереження біологічного різноманіття, підтримка кругообігу та інше) та культурні (туризм, відпочинок, просвіта та ін.). Екологічні чинники безпосередньо впливають на стан і функціонування лісових екосистем, що, у свою чергу, визначає якість та кількість екосистемних послуг, які вони надають (табл. 3). Зміна клімату, деградація ґрунтів і антропогенне навантаження ведуть до зниження потенціалу лісів у постачанні цих послуг.

За оцінками InVEST-моделювання (2022), у центральному Поліссі спостерігається зменшення здатності лісів до зв'язування вуглецю на 10–15 % за

Таблиця 3

## Позитивний та негативний вплив екологічних чинників на екосистемні послуги лісів Полісся

Група послуг	Характеристика	Позитивний вплив	Негативний вплив
Регулюючі	Регулювання водного режиму, зв'язування вуглецю, фільтрація повітря	Здорові насадження з різноманітними деревними породами забезпечують ефективне утримання води, поглинання CO <sub>2</sub> та очищення повітря.	Осушення, часті пожежі, деградація насаджень зменшують здатність лісів утримувати воду та поглинати вуглець.
Забезпечувальні	Деревина, гриби, ягоди, лікарські рослини	Різноріччя видів і стабільні кліматичні умови сприяють високій продуктивності лісу та доступності ресурсів.	Деградація біорізноріччя, хвороби дерев та незаконні рубки скорочують обсяг і якість ресурсів.
Підтримувальні	Кругообіг поживних речовин, ґрунтоутворення	Наявність природних болотних і торфових ландшафтів підтримує родючість ґрунтів і біогеохімічні цикли.	Забруднення ґрунтів, осушення торфовищ та ерозія порушують природні цикли та зменшують родючість.
Культурні	Рекреація, естетична цінність, освіта	Збережені лісові масиви з високою біорізноріччю підвищують привабливість для туризму та навчальних досліджень.	Фрагментація лісів і забруднення знижують рекреаційний потенціал та естетичну цінність територій.

Джерело: створено авторами

останнє десятиріччя. Аналогічно знижується водорегулююча функція, що призводить до частішого підтоплення територій після сильних опадів [20].

Ключовим напрямом сучасних досліджень є встановлення кількісних взаємозв'язків між зміною екологічних факторів і продукцією екосистемних послуг. Наприклад, зменшення середньої вологості ґрунту на 5 % у соснових насадженнях Полісся спричиняє падіння приросту біомаси на 8–12 % [21].

SWOT-аналіз є ефективним інструментом для оцінки впливу екологічних чинників на екосистемні послуги лісів, оскільки дозволяє системно визначити сильні та слабкі сторони, а також можливості і загрози, що впливають на функціонування лісових екосистем. Даний підхід дає змогу виявити ключові фактори, що забезпечують підтримку біорізноріччя, регуляцію клімату, очищення повітря та води, а також інші послуги, які надає ліс. Результати аналізу (табл. 4) дають можливість оцінити стан лісових екосистем та розробити стратегії для сталого управління лісовими ресурсами, зменшення негативного впливу антропогенних та природних чинників і підвищення ефективності охорони та відновлення лісів.

Проведений SWOT-аналіз дозволяє комплексно оцінити потенціал і ризики функціонування лісових екосистем у контексті забезпечення екосистемних послуг. Він дає змогу виявити внутрішні переваги та обмеження лісових екосистем, а також зовнішні можливості й загрози, що формують їхній екологічний стан і здатність виконувати життєво важливі функції. Результати дослідження створюють основу для розроблення стратегій управління лісами на балансі між використанням і відновленням лісових ресурсів, посиленням системи екологічного моні-

рингу та впровадження інтегрованих заходів управління для підтримання екологічної стійкості лісових екосистем і забезпечення сталого потоку їхніх послуг у майбутньому.

На основі проведеного SWOT-аналізу можна запропонувати такі перспективні напрямки збереження та підтримання екосистемних послуг лісів Полісся України:

- підвищення екологічної стійкості лісів – впроваджувати вибірково рубки і відновлювати природні сосново-дубові ліси Полісся;
- запобігання негативним впливам – контролювати незаконні рубки та обмежувати надмірний рекреаційний тиск на болота і соснові масиви;
- використання та збереження екосистемних послуг – розвивати збір дикорослих ягід, грибів та лікарських рослин без шкоди для природних ландшафтів;
- освіта та дослідження – організувати науковий моніторинг стану лісів та просвітницькі програми для місцевих громад регіону;
- політичні та економічні інструменти – впроваджувати програми фінансової підтримки природоохоронних заходів та відновлення деградованих лісів регіону.

**Висновки.** Здійснено комплексний аналіз впливу екологічних чинників на стан, структуру та функціонування лісових екосистем Українського Полісся в контексті забезпечення екосистемних послуг. Встановлено, що кліматичні зміни, деградація ґрунтів, порушення гідрологічного режиму, біотичні загрози та антропогенне навантаження мають синергійний негативний вплив на екологічну стійкість лісів і знижують їх здатність виконувати регулювальні, забезпечувальні, підтримувальні та куль-

## SWOT-аналіз впливу екологічних чинників на екосистемні послуги лісів

Сильні сторони (Strengths)	Слабкі сторони (Weaknesses)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ліси природно стійкі до помірних змін клімату та мають здатність до самовідновлення.</li> <li>- Біорізноманіття забезпечує комплексність і стійкість екосистемних послуг.</li> <li>- Наявність природних регуляторів водного та вуглецевого циклів.</li> <li>- Ліси поглинають вуглець та зменшують негативний вплив на клімат.</li> <li>- Ліси природно фільтрують воду, підтримують родючість ґрунтів та чистоту повітря.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Висока чутливість до екстремальних кліматичних явищ (посухи, повені, шторми).</li> <li>- Вразливість до інвазивних видів, хвороб і шкідників.</li> <li>- Недостатній моніторинг екологічних змін у масштабі локальних екосистем.</li> <li>- Нерівномірний розподіл екологічних чинників у регіонах, що ускладнює управління послугами.</li> <li>- Деякі екосистемні послуги (наприклад, рекреаційні) залежать від людської діяльності і легше порушуються.</li> </ul>
Можливості (Opportunities)	Загрози (Threats)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Використання природної стійкості лісів для адаптації до зміни клімату</li> <li>- Розробка стратегій відновлення лісів з урахуванням екологічних чинників.</li> <li>- Використання даних дистанційного зондування для моніторингу стану лісів.</li> <li>- Підвищення якості екосистемних послуг через біотехнології та відновлення біорізноманіття.</li> <li>- Міжнародна співпраця у сфері захисту та відновлення лісових екосистем.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Зміна клімату: посухи, аномальні температури, зміни опадів.</li> <li>- Масові шкідники та хвороби лісів через глобальне потепління.</li> <li>- Неконтрольовані рубки, деградація ґрунтів, ерозія.</li> <li>- Урбанізація, розростання інфраструктури та порушення природних коридорів</li> <li>- Забруднення повітря, води та ґрунтів, що погіршує функціонування лісових послуг.</li> </ul>

Джерело: створено авторами

турні функції. Результати SWOT-аналізу засвідчили наявність значного природного потенціалу лісових екосистем Полісся, проте його реалізація стримується недостатнім рівнем екологічного моніторингу, наслідками меліорації, незаконних рубок і кліматич-

них змін. Обґрунтовано доцільність впровадження інтегрованих стратегій сталого управління лісами з використанням сучасних інструментів дистанційного зондування, ГІС-моделювання та екосистемного підходу.

## Література

- Pintilii R-D. Recent Advances in Forest Ecosystem Services and Landscape Design. *Forests*. 2025. Is. 16(10). P. 1527. <https://doi.org/10.3390/f16101527>
- Truffer O., et al. Mapping the research of Forest ecosystem Services in Europe: A review. *Forest Policy and Economics*. 2025. Vol. 181. P. 103663 <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2025.103663>
- Appagyeyi B. D. et al. Climate Change Impacts on Forest Ecosystem Services: A Review. *Journal of Landscape Ecology*. 2022. Vol. 15, № 1. P. 1–26. 10.2478/jlecol-2022-0001
- Mengjuan Q., Zhang Y., Liu H., et al. Climate Drivers of Forest Ecosystem Services Supply Based on Machine Learning Approaches. *Ecological Indicators*. 2025. Vol. 159. P.110123. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.114085>
- Zhao Y., Liu S., Wang J., et al. Forest Ecosystem Multifunctionality: A Systematic Review. *Environmental Management*. 2026. Vol. 78. P. 102–118. <https://doi.org/10.1007/s40725-025-00266-4>
- He C., Wang R., Zhang X., et al. Trade-offs and Synergies among Ecosystem Services under Environmental Change. *Nature Sustainability*. 2025. Vol. 8. P. 215–223. <https://doi.org/10.1038/s40494-025-01847-z>
- Валерко Р. А., Герасимчук Л. О., Радучич А. В., Іваненко Р. В. Екосистемні послуги лісів філії «Словечанське лісове господарство» ДП «Ліси України». *Науковий вісник Вінницької академії безперервної освіти. Серія «Екологія. Публічне управління та адміністрування»*. 2023. Вип. 3. С. 71-76. <https://doi.org/10.32782/2786-5681-2023-3.09>
- Мельник-Шамрай В.В., Шамрай В.І., Курбет Т.В., Іванюк Р.О., Кагукіна А.М. Збереження біологічного різноманіття на природоохоронних територіях у межах лісових екосистемах. *Екологічні науки : науково-практичний журнал*. 2025. Вип. 4(61). С. 256-264. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.4-61.41>
- Борсукевич Л. М. Характеристика екосистемних послуг вільхових лісів України. *Український журнал природничих наук*. 2024. № 9. С. 25-36. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.9.2024.3>
- Шищенко П.Г., Гавриленко О.П., Циганок Є.Ю. Екосистемна цінність Голосіївського лісу як міської природоохоронної території: причини і наслідки деградації. *Український географічний журнал*. 2019. № 4. С. 40-49. <https://doi.org/10.15407/ugz2019.04.040>
- Райчук Л. А., Швиденко І. К., Чоботько Г. М. Відновлення лісових екосистем як основа збалансованого розвитку агроландшафтів Українського Полісся. *Агроекологічний журнал*. 2025. № 1. С. 24-31. DOI:10.33730/2077-4893.1.2025.327085

12. Zibtsev, S., Pasternak, V., Vasylyshyn, V., Myroniuk, V., Sydorenko S., Soshenskyi, O. Assessment of carbon emissions due to landscape fires in Ukraine during war in 2022. *Ukrainian Journal of Forest and WoodScience*. 2024. Is. 15(1), P. 126-139. doi: 10.31548/forest/1.2024.126
13. Загвойська Л.Д., Міц Л. В. Розроблення рекомендацій щодо врахування послуг лісових екосистем у діяльності лісогосподарських підприємств України методом TOWS-аналізу. *Економіка та суспільство*. 2025. Вип. 74. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-74-75>
14. Загальна характеристика лісів України. ULR: <https://lnk.ua/zN2rp1aN7> (дата звернення: 10.01.2026).
15. Жуковський О. В., Краснов В. П., Іванюк І. Д., Курбет Т. В., Зборовська О. В. Поширення короїда верхівкового (*Ips acuminatus* (Gyllenhal, 1827) і трахеомікозу хвойних порід стовбуром сосни звичайної. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2022. Вип. 32 (4). С. 38-43. <https://doi.org/10.36930/40320406>
16. Пацева І., Барабаш О., Мельник-Шамрай В., Пацев І. Екологічна оцінка впливу пожеж у природних екосистемах на стан екологічної безпеки Житомирської області. *Проблеми хімії та сталого розвитку*. 2023. № 3. С. 59-65. DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2023-3-8>
17. Kucharzyk, J., Abramchuk, M., Abramchuk, A. et al. The peatlands of Polesie-what is left and what is lost in terms of habitats and carbon stores over the last 100 years. *Biodivers Conserv*. 2025. Is. 34. P. 3715–3731. <https://doi.org/10.1007/s10531-025-03128-4>
18. Zhukovskiy O. V., Krasnov V. P., Kurbet T. V., Shelest Z. M. Current situation with forest radioactive contamination in Volyn and Zhytomyr Polissia. *Forestry and Forest Melioration*. 2023. № 142. С. 106–115. <https://doi.org/10.33220/1026-3365.142.2023.106>
19. Іванюк Р.О., Скоковський М.В., Дмитренко С.А., Мельник-Шамрай В.В. Екосистемні послуги лісових екосистем. Тези Всеукраїнської наукової конференції здобувачів вищої освіти та молодих учених «Екологічна безпека та раціональне природокористування», 14 листопада 2024 року. Житомир : Житомирська політехніка, 2024. С. 38.
20. Соловій І.П., Бурда Ю.А., Жмурко Н.І. Порівняльний аналіз інструментів оцінювання послуг екосистем у контексті управління проектами у сфері природоохоронного просторового планування. *Сталий розвиток економіки*. 2024. № 4 (51) С. 259–266. <https://doi.org/10.32782/2308-1988/2024-51-37>.
21. Lakyda P., Shvidenko A, Kraхner F. et al. Impact of disturbances on the carbon cycle of forest ecosystems in Ukrainian Polissya. *Forests*. 2019. 10(4), 337. <https://doi.org/10.3390/f10040337>

Дата першого надходження статті до видання: 27.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026

## НАУКОВІ ПІДХОДИ ДО ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ЖИТТЯ В ЕКОЛОГІЧНОМУ КОНТЕКСТІ: БІБЛІОМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ

Герасимчук Л.О., Шмідт А.Є.

Державний університет «Житомирська політехніка»

вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир

[gerasim4uk@ukr.net](mailto:gerasim4uk@ukr.net)

У статті здійснено бібліометричний аналіз наукових публікацій, присвячених дослідженню взаємозв'язку між екологією та якістю життя населення. Метою дослідження є виявлення структури наукового дискурсу, основних тематичних кластерів і домінуючих напрямів досліджень у зазначеній галузі. Емпіричною базою слугували 2 933 наукові публікації, індексовані у міжнародній наукометричній базі даних Scopus за період 1971–2025 рр., відібрані за пошуковим запитом, що поєднує категорії «quality of life» та «ecology». Обробку даних здійснено із застосуванням бібліометричного підходу та програмного забезпечення VOSviewer. Для побудови мережі співзв'язності термінів відібрано 334 ключові слова з мінімальною частотою появ п'ять разів. Кластеризацію проведено на основі показника сили зв'язку між термінами, що дало змогу ідентифікувати тематично однорідні групи публікацій та простежити внутрішні зв'язки між основними поняттями.

У результаті аналізу виокремлено чотири тематичні кластери: макроекологічний, людиноцентричний, медико-реабілітаційний та урбаністичний. Встановлено, що найбільшу частку в структурі наукових досліджень становить макроекологічний кластер, у межах якого якість життя розглядається у контексті сталого розвитку, екосистемних послуг і функціонування природних систем. Значну частку займають людиноцентричні напрями, орієнтовані на аналіз ментального здоров'я, фізичної активності, суб'єктивного благополуччя та впливу середовища повсякденного проживання на якість життя. Окрему групу формують дослідження у сфері громадського здоров'я, реабілітації та урбаністики, що відображає зростаючу увагу до вразливих груп населення й якості міського середовища.

Отримані результати дозволяють систематизувати наукові підходи до вивчення взаємозв'язку екології та якості життя, окреслити міждисциплінарні зв'язки між екологічними, соціальними та медичними дослідженнями, а також визначити домінуючі й периферійні напрями подальших наукових пошуків. Бібліометричний кластерний аналіз продемонстрував свою ефективність як інструмент структурування великих масивів наукових даних і може бути використаний у подальших міждисциплінарних дослідженнях у галузі екологічної безпеки та оцінювання якості життя населення. *Ключові слова:* якість життя, екологія, бібліометричний аналіз, VOSviewer, наукові кластери, сталий розвиток.

### Scientific Approaches to the Study of Quality of Life in the Environmental Context: A Bibliometric Analysis. Herasymchuk L., Shmidt A.

The article presents a bibliometric analysis of scientific publications devoted to the study of the relationship between ecology and quality of life. The aim of the study is to identify the structure of the scientific discourse, the main thematic clusters, and the dominant research directions in this field. The empirical basis of the research consisted of 2,933 scientific publications indexed in the international scientometric database Scopus for the period 1971–2025, selected using a search query combining the categories “quality of life” and “ecology”. Data processing was carried out using a bibliometric approach and the VOSviewer software. To construct a term co-occurrence network, 334 keywords with a minimum frequency of five occurrences were selected. Clustering was performed based on the link strength between terms, which made it possible to identify thematically homogeneous groups of publications and to trace internal relationships between key concepts.

As a result of the analysis, four thematic clusters were identified: macroecological, human-centered, medical-rehabilitation, and urban. It was found that the macroecological cluster accounts for the largest share in the structure of scientific research, where quality of life is considered in the context of sustainable development, ecosystem services, and the functioning of natural systems. A substantial proportion of studies belong to human-centered directions, focusing on mental health, physical activity, subjective well-being, and the influence of the everyday living environment on quality of life. A separate group is formed by research in the fields of public health, rehabilitation, and urban studies, reflecting increasing attention to vulnerable population groups and the quality of the urban environment.

The obtained results make it possible to systematize scientific approaches to studying the relationship between ecology and quality of life, outline interdisciplinary links between environmental, social, and medical research, and identify dominant and peripheral directions for further scientific inquiry. Bibliometric cluster analysis has demonstrated its effectiveness as a tool for structuring large volumes of scientific data and can be used in further interdisciplinary studies in the field of environmental safety and quality of life assessment. *Key words:* quality of life, ecology, bibliometric analysis, VOSviewer, scientific clusters, sustainable development.



**Постановка проблеми.** У сучасних умовах погіршення стану довкілля та зростання екологічних ризиків проблема якості життя населення дедалі частіше розглядається у тісному взаємозв'язку з екологічними чинниками. Забруднення навколишнього середовища, кліматичні зміни та деградація природних ресурсів безпосередньо впливають на здоров'я, соціальне благополуччя та умови проживання населення.

Водночас наукові дослідження взаємозв'язку між екологією та якістю життя мають фрагментарний характер і зосереджуються переважно на окремих аспектах проблеми, що ускладнює формування цілісного міждисциплінарного бачення. Зростання кількості публікацій з даної тематики потребує застосування сучасних інструментів систематизації наукових знань. У цьому контексті актуальним є використання бібліометричного кластерного аналізу із застосуванням програмного забезпечення VOSviewer, який дозволяє виявити ключові наукові напрями, тематичні кластери та тенденції досліджень у сфері взаємодії екології та якості життя.

**Актуальність дослідження.** Актуальність дослідження зумовлена зростаючим впливом екологічних факторів на якість життя населення в умовах посилення антропогенного навантаження на довкілля, кліматичних змін та урбанізаційних процесів. Стан навколишнього середовища дедалі більше визначає рівень здоров'я населення, соціальне благополуччя, комфорт проживання та стійкість територіального розвитку, що робить проблему взаємозв'язку між екологією та якістю життя ключовою для сучасної науки та практики.

Одночасно спостерігається стрімке зростання кількості наукових публікацій, присвячених екологічним аспектам якості життя, що ускладнює їх систематизацію та узагальнення традиційними методами аналізу літератури. У цьому контексті застосування бібліометричного кластерного аналізу з використанням програмного забезпечення VOSviewer є актуальним інструментом для виявлення провідних наукових напрямів, тематичних кластерів і дослідницьких трендів, а також для формування цілісного уявлення про сучасний стан і перспективи розвитку досліджень у даній галузі.

**Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.** Авторський доробок пов'язаний з актуальними науковими та практичними завданнями у сфері екології та сталого розвитку, зокрема з дослідженням впливу стану довкілля на якість життя населення. Отримані результати сприяють систематизації наукових підходів, виявленню ключових тематичних напрямів і прогалів у дослідженнях взаємозв'язку між екологією та якістю життя.

Практична значущість роботи полягає у можливості використання результатів бібліометричного аналізу для обґрунтування екологічної політики, стратегій сталого розвитку та управлінських рішень,

спрямованих на підвищення якості життя населення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні підходи до оцінювання якості життя ґрунтуються на уявленні про її багатовимірність, де поряд із соціально-економічними та медичними складовими вагоме місце посідають умови довкілля й екологічна безпека [9]. У європейському вимірі екологічна компонента якості життя розглядається як один із ключових напрямів моніторингу добробуту населення, зокрема через індикатори природного та життєвого середовища [12].

У міжнародних дослідженнях отримано переконливі докази негативного впливу забруднення довкілля на суб'єктивне благополуччя. Зокрема, показано кореляцію між високими рівнями забруднення атмосферного повітря та зниженням відчуття щастя у населення [15], а шумове забруднення визначено суттєвим фактором зниження загальної задоволеності життям у великих містах [19]. Окремий напрям досліджень стосується впливу глобальних екологічних змін на психічне здоров'я – зростання тривожних і депресивних станів, асоційованих із кліматичною нестабільністю [8]. У наукових публікаціях обґрунтовано визначальну роль стану навколишнього середовища у формуванні показників здоров'я та якості життя дитячого населення [13]. У межах макрорегіональних досліджень, виконаних для країн ЄС, встановлено статистично значущий зв'язок між рівнем екологічної безпеки регіонів і самооцінкою здоров'я та життєвих перспектив населення [12].

Значну групу робіт становлять дослідження, спрямовані на інтеграцію екологічних факторів якості життя з просторовим плануванням та управлінням розвитком територій. Результати систематичного огляду наукових публікацій засвідчують, що узгодження землекористування, збереження екосистемних послуг і потреб населення є ключовою умовою підтримання стабільних показників якості життя [11].

Особливої гостроти взаємозв'язок «екологія – якість життя» набуває в умовах воєнних конфліктів. Узагальнення наслідків війни в Україні свідчить про масштабні руйнування екосистем і підвищені ризики для здоров'я населення через забруднення повітря, води, ґрунтів та деградацію природних ресурсів [10, 16], що формують довготривалі загрози для продовольчої безпеки та безпечності середовища проживання. На національному рівні додатково акцентується потреба досягнення стратегічних природоохоронних орієнтирів; зокрема, у межах моніторингу Цілей сталого розвитку [17].

В українському науковому просторі розвиваються дослідження, спрямовані на оцінювання екологічної безпеки та її впливу на якість життя: розроблено підходи до оцінки екологічної безпеки територій Житомирської області за показниками утворення відходів [1], запропоновано інтегральний показник екологічного стану м. Житомир для аналізу тенденцій його розвитку [2], дослідження

кліматичних чинників фіксують прояви зміни температури повітря [3] та роль викидів діоксиду вуглецю у формуванні ризиків регіону [4]. Соціально-екологічний вимір проблеми представлено аналізом сприйняття загроз довіллю внаслідок воєнних дій очима дітей [5]. Із застосуванням ГІС-інструментів досліджено демографічну складову якості життя населення на радіоактивно забруднених територіях Житомирщини [14]. Окремий блок робіт присвячено якості питної води та її впливу на здоров'я населення, зокрема оцінюванню екологічного стану сільських поселень у контексті сталого розвитку [17] і встановленню зв'язку між якістю води з нецентралізованих джерел та захворюваністю населення регіону [18].

Паралельно зростає роль й бібліометричних та цифрових інструментів у систематизації наукових знань [6, 7].

Отже, наявні наукові результати підтверджують значущість екологічних чинників у формуванні якості життя та демонструють широку палітру підходів – від аналізу локальних забруднень і ментального здоров'я до інтегральних оцінок екологічної безпеки та територіального управління.

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття та новизна досліджень.** Попри наявність значної кількості досліджень, присвячених окремим екологічним аспектам якості життя, наукові напрацювання залишаються фрагментарними й не забезпечують цілісного уявлення про структуру та взаємозв'язки досліджень у цій сфері. Водночас подальшого розвитку потребує системне узагальнення наукового поля, зокрема шляхом бібліометричного кластерного аналізу із застосуванням VOSviewer, що дозволить виявити провідні напрями, міждисциплінарні зв'язки та перспективні дослідницькі ніші у тематиці взаємозв'язку екології та якості життя.

Наукова новизна дослідження полягає у комплексному застосуванні бібліометричного аналізу для структурування та візуалізації сучасного наукового дискурсу з означеної проблематики.

**Методологічне значення** дослідження полягає у застосуванні бібліометричного кластерного аналізу з використанням програмного забезпечення VOSviewer як інструменту систематизації та візуалізації наукових знань у сфері взаємозв'язку екології та якості життя. Запропонований підхід дозволяє структуровано аналізувати великі масиви наукових публікацій, виявляти тематичні кластери, міждисциплінарні зв'язки та динаміку дослідницьких трендів.

Для аналізу наукового дискурсу щодо взаємозв'язку екології та якості життя застосовано бібліометричний підхід із використанням наукометричних інструментів візуалізації. Емпіричною базою дослідження слугувала міжнародна реферативна база даних Scopus. Формування вибірки здійснювалося за пошуковим запитом «quality of life» AND «ecology».

До вибірки включено 2 933 наукові публікації, опубліковані у період 1971–2025 рр., що забезпечує комплексне охоплення розвитку наукових підходів у зазначеній проблематиці.

Подальша обробка даних здійснювалася з використанням програмного забезпечення VOSviewer. Для аналізу відібрано ключові слова авторів та індексовані терміни, що зустрічалися у публікаціях не менше 5 разів. У результаті сформовано масив із 334 ключових слів, який було використано для побудови мережі співзвучності термінів (co-occurrence network).

Кластеризація здійснювалася із використанням показника сили зв'язку (link strength) між термінами. Отримані кластери інтерпретовано відповідно до їхнього тематичного наповнення та концептуальної спрямованості. Візуалізація результатів дозволила ідентифікувати ключові наукові напрями, структурувати дослідницьке поле та визначити домінуючі й периферійні тематичні блоки.

Отримані результати можуть бути використані як методологічна основа для подальших міждисциплінарних досліджень, розроблення концептуальних моделей, а також для обґрунтування вибору напрямів наукового пошуку у галузі екологічної безпеки та оцінювання якості життя населення.

**Виклад основного матеріалу.** Результати бібліометричного аналізу свідчать про сформований і структурований науковий дискурс щодо взаємозв'язку екології та якості життя. Центральним елементом досліджуваного термінологічного поля є поняття «якість життя», навколо якого концентруються інші ключові категорії, що підтверджує його інтегративний характер. Аналіз частотності ключових слів (рис. 1) засвідчує домінування термінів, пов'язаних із сталістю, сталим розвитком, екосистемними послугами, ментальним здоров'ям і фізичною активністю, що вказує на міждисциплінарний характер досліджень.

Застосування алгоритмів кластеризації дозволило структурувати дослідницьке поле на чотири тематичні кластери, просторове розміщення яких відображено на рис. 2.

Узагальнення отриманих результатів дає змогу виокремити дві концептуальні моделі інтерпретації взаємозв'язку екології та якості життя: макроекологічну, орієнтовану на системний аналіз глобальних екологічних процесів, та людиноцентричну, зосереджену на дослідженні повсякденного досвіду взаємодії індивіда з навколишнім середовищем.

Макроекологічний (червоний) кластер охоплює дослідження, у яких якість життя розглядається як результат функціонування природних і соціо-економічних систем. Ключові терміни цього напрямку, наведені на рис. 3, зосереджені навколо понять «сталість», «сталій розвиток», «довкілля» та «екосистемні послуги», що підкреслює визначальну роль природного капіталу у формуванні добробуту населення.

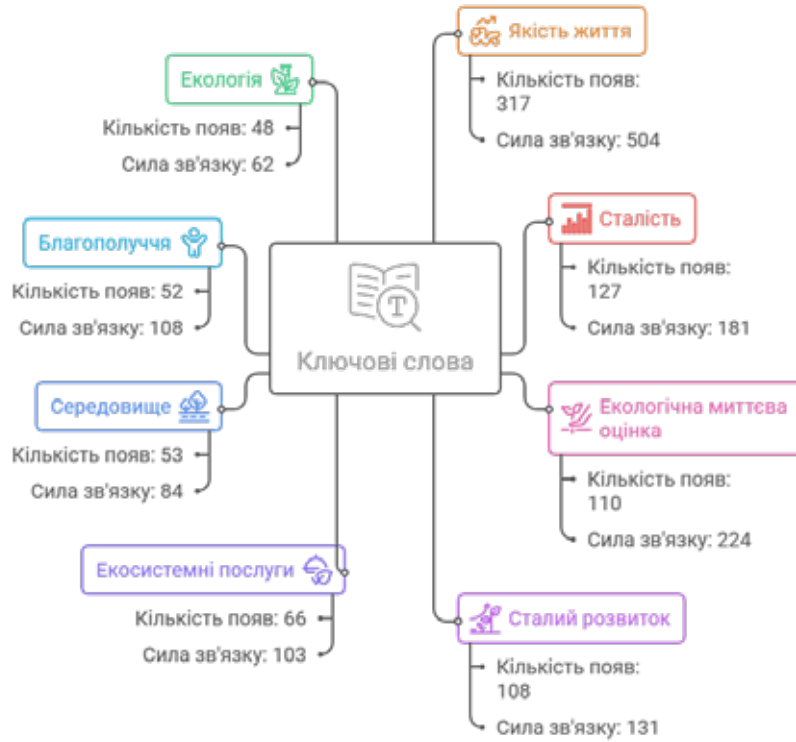


Рис. 1. Найбільш уживані ключові слова та показники їх зв'язності у вибірці публікацій

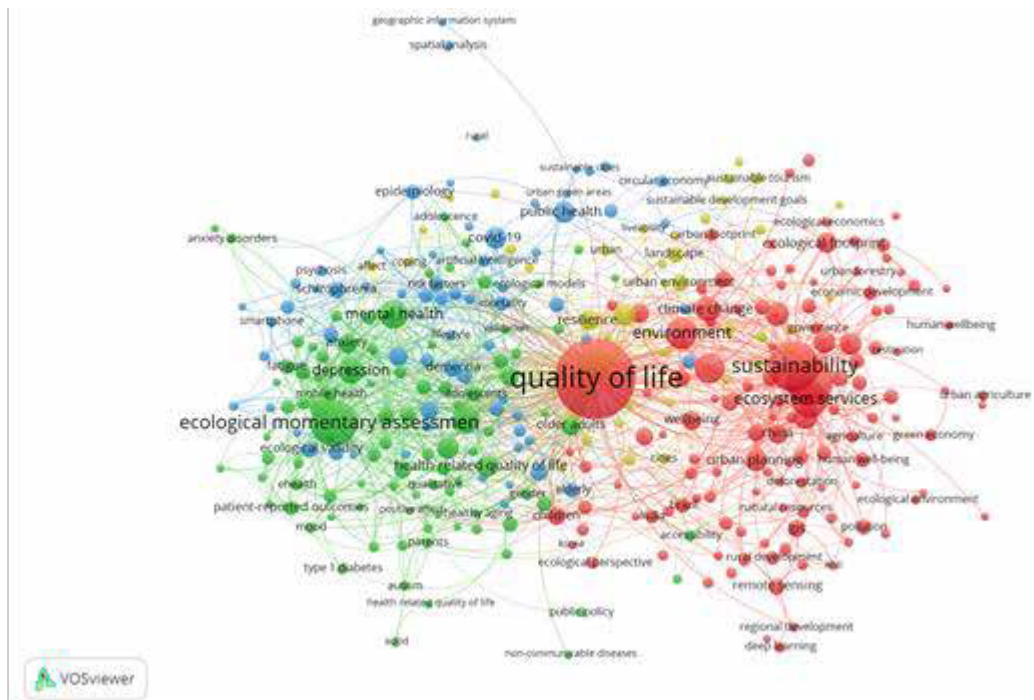


Рис. 2. Візуалізація даних бібліографічної бази даних Scopus

Людиноцентричний (зелений) кластер репрезентує дослідження, спрямовані на аналіз індивідуального досвіду взаємодії людини з навколишнім середовищем. Ключовим методологічним інструментом цього напрямку є екологічна миттєва оцінка, що дозво-

ляє фіксувати зміни психоемоційного стану в реальному часі. Тематичне наповнення кластера охоплює питання ментального здоров'я, депресивних розладів, фізичної активності та соціальної підтримки як детермінант суб'єктивного благополуччя (рис. 3).

Кластер громадського здоров'я та реабілітації (синій) об'єднує дослідження, зосереджені на вивченні впливу екологічних умов на вразливі групи населення, зокрема осіб літнього віку. Як свідчать дані, представлені на рис. 3, у межах цього напрямку аналізуються питання промоції здоров'я, реабілітації та подолання наслідків глобальних криз, зокрема пандемії COVID-19.

Урбаністичний (жовтий) кластер акцентує увагу на взаємозв'язку суб'єктивного благополуччя з характеристиками міського середовища. Ключові поняття цього напрямку, наведені на рис. 5, охоплюють благополуччя, здоров'я, резильєнтність, міське середовище та ландшафт, що відображає зростання ролі просторового планування й урбаністичних підходів у дослідженнях якості життя.

Узагальнення кількісних характеристик кластерів свідчить про домінування макроекологічного напрямку (48,1 %), що відображає орієнтацію сучасної науки на глобальні виклики сталого розвитку. Водночас сукупна частка людиноцентричних кластерів (зеленого – 26,1%, синього – 16% та жовтого – 9,8%) перевищує 50 %, що підкреслює гуманістич-

но-екологічний вектор сучасних досліджень і розгляд людини як невід'ємного елемента екосистеми.

**Головні висновки.** Бібліометричний аналіз даних Scopus підтвердив міждисциплінарний характер наукового дискурсу щодо взаємозв'язку екології та якості життя. За допомогою VOSviewer виокремлено чотири тематичні кластери: макроекологічний, людиноцентричний, медико-реабілітаційний та урбаністичний. Домінування макроекологічного кластера свідчить про пріоритетність проблем сталого розвитку та екосистемних послуг у сучасних дослідженнях. Сукупна частка людиноцентричних напрямів – 51,9% – підкреслює зростання ролі індивідуального благополуччя та гуманістичного підходу. Застосований бібліометричний підхід є ефективним інструментом систематизації наукових знань і визначення перспектив подальших досліджень.

**Перспективи подальших досліджень** вбачаємо у поєднанні бібліометричних результатів з емпіричними даними про стан довкілля, здоров'я населення та соціальне благополуччя для підвищення прикладної цінності досліджень.

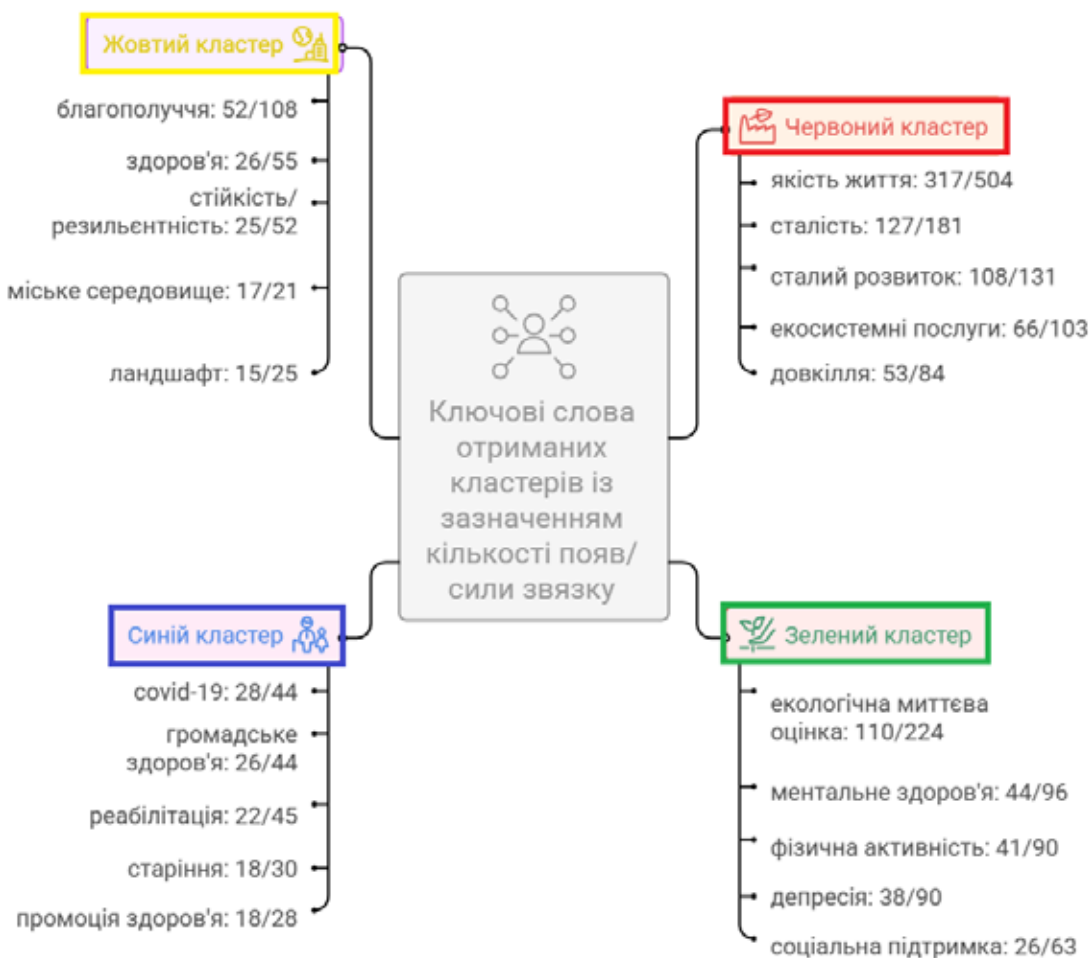


Рис. 3. Тематичні кластери ключових слів у дослідженнях взаємозв'язку екології та якості життя за результатами бібліометричного аналізу в VOSviewer

## Література

1. Герасимчук Л., Валерко Р., Залужна Є. Оцінка рівня екологічної безпеки територій Житомирської області за обсягами утворення відходів. *Проблеми хімії та сталого розвитку*. 2022. № 1. С. 3–9. DOI: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2022-1-1>.
2. Герасимчук Л.О., Валерко Р.А. Интегральный показатель экологического статуса города Житомир как основа для восстановления тенденций його розвитку. *Innovations in the Education of the Future: Integration of Humanities, Technical and Natural Sciences*. Prague, 2023. С. 160–181. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10259058>.
3. Герасимчук Л. О., Валерко Р. А., Пацева І. Г. Прояв зміни температури повітря на території м. Житомир. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2023. Вип. 29. С. 6–16. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2023-29-01>.
4. Герасимчук Л. О., Валерко Р. А., Розгон В. О., Маліновська В. О. Тенденції викидів діоксиду вуглецю як чинника кліматичних змін в атмосферне повітря Житомирської області від стаціонарних джерел та прогнозування їх обсягів. *Проблеми хімії та сталого розвитку*. 2023. № 3. С. 49–58. DOI: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2023-3-7>.
5. Герасимчук Л. О., Валерко Р. А., Ярошенко Б. О., Члек О. М. Загрози довкілля внаслідок військових дій очима дітей. *Екологічні науки*. 2022. № 4 (43). С. 168–173. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.4-43.28>.
6. Герасимчук Л. О., Валерко Р. А., Пацева І. Г., Пацев І. С. Лісові пожежі у фокусі кластерного аналізу: екосистемні та технологічні аспекти через призму VOSviewer / *Ukrainian Journal of Natural Sciences*. 2025. № 11. С. 270–279. DOI: <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.11.2025.29>.
7. Мінтій І. С., Вакалок Т. А., Ткаченко В. А. Використання сервісу VOSviewer у науковій діяльності. *Інноваційна педагогіка*. 2024. № 75. С. 279–285. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-6085/2024/75.54>.
8. Cianconi P., Betrò S., Janiri L. The impact of climate change on mental health: A systematic descriptive review. *Frontiers in Psychiatry*. 2020. Vol. 11. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpsy.2020.00074>.
9. Ferrans C. E., Zerwic J. J., Wilbur J. L., Larson J. L. Conceptual model of health-related quality of life. *Journal of Nursing Scholarship*. 2005. Vol. 37(4). P. 336–342. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1547-5069.2005.00058.x>.
10. Herasymchuk L., Patseva I., Valerko R., Ustymenko V. Military actions in Ukraine as ecocide and challenge to formulas of peace. *Present Environment and Sustainable Development*. 2024. Vol. 18(2). P. 275–293. DOI: <https://doi.org/10.47743/pesd2024182015>.
11. Liu M., Wei H., Dong X., Wang X.-C., Zhao B., Zhang Y. Integrating land use, ecosystem service, and human well-being: A systematic review. *Sustainability*. 2022. Vol. 14(11):6926. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14116926>.
12. Murawska A., Sieg P., Stereńczak S. Environmental safety and self-perceived quality of life and health: The example of the European Union. *Sustainability*. 2025. Vol. 17(18):8412. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17188412>.
13. Petropoulou P. Environment and public health: How the environment affects children's health and quality of life. *Cureus*. 2025. Vol. 17. DOI: <https://doi.org/10.7759/cureus.78299>
14. Romanchuk L., Herasymchuk L., Valerko R., Pitsil A. Study of the demographic component quality of life of the population of the radioactively contaminated territory of the Zhytomyr region using ArcGIS software. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2023. Vol. 24(5). P. 63–75. DOI: <https://doi.org/10.12912/27197050/163671>.
15. Sanduijav C., Ferreira S., Filipski M., Hashida Y. Air pollution and happiness: Evidence from the coldest capital in the world. *Ecological Economics*. 2021. Vol. 187. P. 107085. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107085>.
16. Solokha M., Demyanyuk O., Symochko L., Mazur S., Vynokurova N., Sementsova K., Mariychuk R. Soil degradation and contamination due to armed conflict in Ukraine. *Land*. 2024. Vol. 13(10). P. 1614. DOI: <https://doi.org/10.3390/land13101614>.
17. Valerko R., Herasymchuk L., Patseva I., Gnatuk B. Assessment of the ecological state of rural settlements by indicators of drinking water quality in the context of sustainable development. *Journal Environmental Problems*. 2024. № 9(1). P. 28–34. DOI: <https://doi.org/10.23939/ep2024.01.028>.
18. Valerko R., Herasymchuk L., Patseva I., Lukianova V., Pokshevnytska T. The impact of drinking water quality from non-centralized water supply sources on the population morbidity in the region of Zhytomyr (Ukraine). *Romanian Journal of Geography*. 2025. Vol. 69(1). P. 135–148. DOI: <https://doi.org/10.59277/RRG.2025.1.09>.
19. Yang D., Liu X., Ren Z., Li M. Relation between Noise Pollution and Life Satisfaction Based on the 2019 Chinese Social Survey. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. Vol. 19(12):7015. <https://doi.org/10.3390/ijerph19127015>.

Дата першого надходження статті до видання: 28.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026

## СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ВИЗНАЧАЛЬНИХ ЧИННИКІВ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧОЇ ПОВЕДІНКИ МОЛОДІ В КОНТЕКСТІ КУЛЬТУРИ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

Русакова Т.І., Войтенко Ю.В., Золотько О.В., Пасічник В.С., Максименко К.О.

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара  
пр. Науки, 72, 49010, м. Дніпро

[rusakovati1977@gmail.com](mailto:rusakovati1977@gmail.com), [Juliya.voy.1983@gmail.com](mailto:Juliya.voy.1983@gmail.com), [zltkelena@gmail.com](mailto:zltkelena@gmail.com),  
[pasichnykvs@365.dnu.edu.ua](mailto:pasichnykvs@365.dnu.edu.ua), [maksymenkoko@365.dnu.edu.ua](mailto:maksymenkoko@365.dnu.edu.ua)

У статті представлено результати комплексного дослідження педагогічних, когнітивних, мотиваційних та поведінкових чинників, що формують ресурсозберігаючу поведінку молоді як складову культури екологічної безпеки. Актуальність роботи зумовлена потребою кількісного обґрунтування чинників, які визначають готовність молодого покоління до екологічно відповідальних дій, що є ключовим завданням сучасної екологічної освіти. Метою дослідження є встановлення взаємозв'язків між інтегральними індексами педагогічних, когнітивних, мотиваційних та поведінкових факторів, а також побудова статистичної моделі, яка дозволяє визначити їх відносний внесок у формування екологічно орієнтованої поведінки. Методологічну основу дослідження становить описова статистика, візуалізація даних за допомогою діаграм, кореляційний аналіз та множинна лінійна регресія. Побудовані інтегральні індекси забезпечили узагальнення набору даних і дозволили оцінити прояви кожної групи чинників на рівні окремих респондентів. Кореляційний аналіз виявив статистично значущі зв'язки між педагогічними, когнітивними та мотиваційними характеристиками та поведінковими намірами, що підтверджує їх взаємозалежність і системний характер впливу. Регресійне моделювання показало високий рівень пояснювальної здатності моделі ( $R^2=0,8$ ) та визначило, що найбільший вплив на поведінковий індекс має когнітивний компонент, за яким слідують мотиваційний та педагогічний чинники. Відносна середня похибка між розрахунковими та фактичними значеннями становить не більше 5,3 %, а максимальна досягає 9,3 %, що підтверджує достатню точність побудованої моделі. Наукова новизна роботи полягає у поєднанні педагогічних, психологічних та поведінкових показників у єдиній кількісній моделі оцінювання ресурсозберігаючої поведінки молоді. Практичне значення результатів полягає у можливості використання отриманих індексів і моделі для моніторингу ефективності екологічної освіти, вдосконалення освітніх програм та підвищення рівня культури екологічної безпеки серед молоді. *Ключові слова:* ресурсозберігаюча поведінка, культура екологічної безпеки, інтегральні індекси, кореляційно-регресійний аналіз, екологічна освіта.

### Statistical analysis of determining factors of youth resource-saving behavior in the context of environmental safety culture.

Rusakova T., Voitenko Y., Zolotko O., Pasichnyk V., Maksymenko K.

The article presents the results of a comprehensive study of pedagogical, cognitive, motivational and behavioural factors that shape resource-saving behaviour among young people as an integral component of environmental safety culture. The relevance of the research is determined by the need for quantitative justification of the factors influencing the readiness of the younger generation to engage in environmentally responsible actions, which is a key task of modern environmental education. The purpose of the study is to identify the relationships between the integral indices of pedagogical, cognitive, motivational and behavioural factors and to develop a statistical model that allows determining their relative contribution to the formation of environmentally oriented behaviour. The methodological framework includes descriptive statistics, data visualisation using box-and-whisker plots, correlation analysis and multiple linear regression. The constructed integral indices enabled the aggregation of a large set of indicators and made it possible to assess the expression of each factor at the level of individual respondents. Correlation analysis revealed statistically significant relationships between pedagogical, cognitive and motivational characteristics and behavioural intentions, confirming their interdependence and the systemic nature of influence. Regression modelling demonstrated a high explanatory power of the model ( $R^2=0.8$ ) and showed that the cognitive component has the strongest impact on the behavioural index, followed by the motivational and pedagogical factors. The relative mean error between the calculated and actual values does not exceed 5.3%, while the maximum error reaches 9.3%, which confirms the sufficient accuracy of the developed model. The scientific novelty of the study lies in integrating pedagogical, psychological and behavioural indicators into a single quantitative model for assessing youth resource-saving behaviour. The practical value of the results is associated with the possibility of using the developed indices and the model to monitor the effectiveness of environmental education, improve educational programmes and strengthen the environmental safety culture among young people. *Key words:* resource-saving behaviour, environmental safety culture, integral indices, correlation-regression analysis, environmental education.



**Постановка проблеми.** Формування культури екологічної безпеки серед молоді є одним із ключових чинників забезпечення соціального та економічного розвитку держави, а також мінімізації ризиків для навколишнього середовища. Незважаючи на зростання суспільної уваги до екологічних питань, рівень екологічно відповідальної поведінки молоді залишається недостатньо високим. Це проявляється у необ'єктивному сприйнятті екологічних ризиків, низькій мотивації до екологічно безпечної поведінки та обмеженій участі в екологічних ініціативах та практиках. Особливої уваги потребує студентська молодь, яка формує цінності та поведінкові моделі в умовах швидких соціально-економічних змін, у тому числі в період воєнного стану та підвищених техногенних ризиків в Україні.

Як зазначено в роботі [1], екологічна культура не формується хаотично, а має системний характер, який об'єднує освіту, виховання та практичну екологічну діяльність. Університети мають створювати сприятливі умови для розвитку екологічної культури студентів – через системне впровадження екологічних дисциплін, забезпечення екологічної практичної діяльності та активне виховання.

За цих умов актуальною залишається проблема формування рівня культури екологічної безпеки студентів, визначення чинників, що впливають на її становлення, та обґрунтування освітніх і практичних заходів, спрямованих на її підвищення.

**Актуальність дослідження.** У сучасних умовах стрімкого розвитку інформаційних технологій, цифровізації, розширення ринку товарів та інтенсифікації виробництва питання формування культури екологічної безпеки набуває особливої актуальності. Молодь, зокрема студенти, має широкий доступ до різноманітних можливостей щодо підвищення власного матеріального добробуту, що формує нові споживчі потреби та стимули. З одного боку, матеріальна забезпеченість сприяє особистісному розвитку, соціальній стабільності та можливості самореалізації. З іншого боку, розширення споживання нерідко приводить до надмірного придбання товарів, короткого циклу їх використання та швидкого перетворення продукції на відходи.

Поширеними є тенденції частих оновлень техніки, зміни одягу чи транспортних засобів на нові моделі, інтенсивного використання електронних пристроїв без енергозберігаючих налаштувань, а також низький рівень участі у сортуванні сміття. Зростання обсягів побутових відходів, зокрема пластикових, неналежне ставлення до ресурсів і нерациональне споживання призводять до виснаження природних ресурсів, погіршення стану повітря та води, зростання антропогенного навантаження на довкілля та ризиків для здоров'я населення.

В дослідженні [2] описані актуальні соціально-психологічні проблеми молоді, показано зміни у системі цінностей студентства, нестабільність

світогляду, вплив медіа. А також підкреслено, що сучасна молодь потребує цілеспрямованого формування відповідальних цінностей, у тому числі екологічних. Наголошено на проблемі низького рівня критичного мислення та екологічної відповідальності як загальної тенденції, виявленої при спілкуванні. Це підтверджує, що молодь є соціально вразливою до впливів і потребує формування екологічної свідомості в умовах сучасних викликів.

В статті [3] аналізуються ціннісні орієнтації студентів, їх формування та роль освіти. Підкреслюється, що сучасний соціокультурний простір є динамічним і суперечливим, що ускладнює стабільне становлення цінностей. Наголошується на важливості освітнього середовища для формування відповідального і свідомого ставлення, у тому числі до природного середовища. Обґрунтовується роль ЗВО у формуванні екологічної свідомості та культури екологічної безпеки.

В роботі [4] підкреслюється необхідність формування екологічної культури як умови сталого розвитку, доводиться, що студенти мають недостатній рівень екологічних цінностей та потребують спеціальних педагогічних впливів, розкривається взаємозв'язок між усвідомленим ставленням до природи та культурою безпеки.

Визначення чинників, що впливають на становлення та закріплення екологічної свідомості, а також формування культури екологічної безпеки серед розвиненої, інтелектуально спроможної молоді, насамперед студентів університетів, є одним із ключових напрямів сучасних наукових досліджень. Саме у студентському віці відбувається інтенсивне формування ціннісних орієнтацій, світоглядних позицій та поведінкових моделей, які визначатимуть рівень екологічної відповідальності майбутніх фахівців і громадян. Дослідження чинників, що впливають на ці процеси, дозволяє виявити умови, за яких екологічна свідомість стає стійким елементом особистості, а культура екологічної безпеки – невід'ємною складовою повсякденної поведінки молоді.

**Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.** Розвиток культури екологічної безпеки студентської молоді узгоджується з ключовими міжнародними та національними стратегічними документами. Зокрема, Стратегія сталого розвитку ООН "Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development" визначає у цілі 4.7 необхідність формування екологічної свідомості, компетентностей та відповідального ставлення до довкілля як одного з базових завдань сучасної освіти. У документах UNESCO "Education for Sustainable Development" (ESD 2030) наголошується на важливості виховання екологічно відповідальної поведінки молоді як основи переходу до моделей ресурсозбереження та сталого використання природних ресурсів. Європейський зелений курс "European Green Deal 2019", попри свій полі-

тичний характер у межах ЄС, визначає стратегічні орієнтири й для України як країни-кандидата, акцентуючи на енергоефективності, ресурсозбереженні та підвищенні екологічної відповідальності громадян.

На національному рівні Стратегія національної екологічної політики України до 2030 року, Концепція екологічної освіти та Національна економічна стратегія – 2030 підкреслюють важливість формування екологічної культури й екологічної компетентності громадян, особливо молоді, як пріоритетного напрямку державної політики у сфері сталого розвитку.

Таким чином, дослідження чинників розвитку культури екологічної безпеки студентів має виражене наукове та практичне значення, відображає глобальні й національні пріоритети та відповідає актуальним завданням забезпечення сталого розвитку держави.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

У дослідженні [5] представлено теоретичні засади формування культури екологічної безпеки студентів технічних університетів, запропоновано структурно-функціональну модель педагогічного забезпечення та окреслено умови, що сприяють розвитку екологічної культури. Водночас робота має описовий характер, відсутній кількісний аналіз, що дозволив би визначити силу та напрями взаємозв'язків між чинниками формування культури екологічної безпеки.

У роботі [6] визначено педагогічні вимоги та умови, необхідні для розвитку екологічної культури студентів, а також проаналізовано значення інтеграції екологічних знань у навчальні програми закладів вищої освіти. Освітнє середовище університету охарактеризовано як важливий фактор формування екологічної свідомості та екологічно відповідальної поведінки студентської молоді. Проте в дослідженні не представлено кількісної оцінки впливу конкретних педагогічних, мотиваційних і поведінкових чинників, що унеможливило встановлення сили та напрямів їх взаємозв'язків у процесі формування культури екологічної безпеки.

У статті [7] виконано емпіричне дослідження впливу екологічної освіти на поведінку студентів. Виявлено кореляції між екологічними знаннями та поведінкою, рівнем екологічної активності, особистими характеристиками студентів. Розглянуто поведінковий компонент екологічної культури. При цьому автори зосереджуються лише на поведінковому вимірі, не аналізуючи культуру екологічної безпеки як комплексне явище (цінності, компетентності, мотивація, відповідальність).

У роботі [8] проведено перехресне опитування студентів щодо культури безпеки та виявлено ключові фактори, що впливають на загальну безпекову культуру, зокрема довіру, дисципліну та ставлення до безпеки. Для аналізу використано кількісний підхід із застосуванням шкал та статистичних методів.

Утім, у дослідженні не створено інтегральної моделі, яка б відображала взаємозв'язки між групами чинників та дозволяла визначити їхній відносний внесок у формування загальної безпекової культури.

У статті [9] проаналізовано екологічну поведінку студентів університетів та визначено ключові чинники, що впливають на їхню екологічну активність. Автори зосереджуються на ролі екологічних знань, особистих цінностей та соціальних норм у формуванні поведінкових моделей студентської молоді. Застосовано кількісні методи оцінювання, що дозволяє визначити мотиваційні та когнітивні детермінанти екологічно відповідальної поведінки. Водночас у роботі не сформовано узагальненої багатфакторної моделі та не проаналізовано взаємозв'язки між окремими групами чинників, що залишає простір для подальших досліджень.

У дослідженні [10] проаналізовано вплив теорії екологічної цивілізації на проєкологічну поведінку студентів, використовуючи модель «знання-ставлення-поведінка». Автори встановили, що екологічні знання опосередковано впливають на поведінку через формування екологічних переконань та позитивного ставлення до довкілля. Водночас робота не містить розгорнутої факторної чи структурної моделі, яка б дозволила визначити відносний внесок окремих складових у формування поведінкових намірів студентів.

У роботі [11] досліджено готовність студентів до участі в екологічній діяльності та оцінено ефективність екологічної освіти у ЗВО. Визначено ключові компоненти екологічної обізнаності та окреслено роль навчального середовища. Утім проаналізовано лише загальну екологічну грамотність, але відсутній кількісний аналіз впливу різних чинників на формування поведінкових практик студентів. Не визначено, які фактори є детермінуючими (освітні, соціальні, мотиваційні).

У статті [12] проаналізовано роль екологічної освіти у формуванні здоров'я молоді. Автори дослідили вплив рівня екологічних знань на ставлення до здоров'я, виокремили ключові освітні чинники (екологічна поінформованість, виховні підходи, участь у природоохоронних заходах), що асоціюються з кращими показниками здоров'я. Використано анкетування й елементи статистичної обробки для оцінки взаємозв'язків між освітніми параметрами та показниками здоров'я. Водночас у роботі відсутній кількісний аналіз структурних взаємозв'язків між групами чинників, не побудовано кореляційної чи регресійної моделі, яка б дозволила визначити силу та напрям впливу окремих компонент екологічної освіти на здоров'я учнів.

У роботі [13] досліджено можливості інформаційних засобів у формуванні екологічної свідомості студентської молоді. Автори проаналізували роль медіаконтенту у підвищенні екологічної обізнаності. Встановлено, що системне використання

інформаційних ресурсів (освітніх платформ, соціальних мереж, масових онлайн-курсів) сприяє розвитку позитивних екологічних установок та підвищує рівень екологічної компетентності студентів. Водночас робота має описовий характер і не пропонує кількісної моделі, яка б дозволила ідентифікувати провідні детермінанти або оцінити їхній внесок у формування культури екологічної безпеки.

У дослідженні [14] проаналізовано рівень поінформованості молоді щодо екологічних проблем та оцінено, наскільки знання про стан довкілля впливають на формування екологічної свідомості. Автори показують, що студенти загалом добре орієнтуються в основних екологічних загрозах, проте наявність знань не завжди трансформується в екологічно відповідальну поведінку. Разом із тим робота не містить кількісного аналізу взаємозв'язків між рівнем знань, цінностями, намірами та реальною поведінкою студентів. Відсутня модель, яка б описувала структурні зв'язки між компонентами екологічної культури.

Таким чином, в сучасних дослідженнях розкрито широкий спектр способів формування екологічної свідомості та культури екологічної безпеки студентської молоді. Зокрема педагогічні умови й вимоги, вплив екологічної освіти на здоров'я, роль когнітивних, мотиваційних і поведінкових чинників.

Водночас існує потреба у подальших дослідженнях, спрямованих на побудову кількісної моделі розвитку культури екологічної безпеки студентської молоді.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** Попри значну кількість досліджень, присвячених формуванню екологічної свідомості та поведінкових навиків, низка аспектів цієї проблематики залишається недостатньо опрацьованою. Насамперед, бракує комплексних статистичних моделей, здатних одночасно описати взаємозв'язки між педагогічними, когнітивними, мотиваційними та поведінковими чинниками, що визначають рівень сформованості культури екологічної безпеки. Також недостатньо представлено підходи, які б дозволили кількісно оцінити відносний вплив кожного з цих чинників та встановити їхню ієрархію.

**Методологічне або загальнонаукове значення.** У даній роботі вирішено зазначені обмеження шляхом застосування як методів описової статистики, так і інструментів аналізу даних, включно з кореляційно-регресійним аналізом. Це дає змогу визначити ключові чинники, що впливають на формування екологічно відповідальної поведінки, а також оцінити їхній відносний внесок у структурі екологічної свідомості молоді. Загальнонаукова цінність проведеного дослідження полягає у тому, що воно поглиблює теоретичні уявлення про взаємозв'язки між освітніми, когнітивними, мотиваційними та поведінковими чинниками, що визначають рівень екологічної свідомості та готовності до відповідальної діяль-

ності у сфері довкілля. Отримані результати мають важливе практичне значення для удосконалення освітніх програм і педагогічних стратегій, спрямованих на підвищення екологічної компетентності студентів.

**Викладення основного матеріалу.** Для дослідження культури екологічної безпеки використувався комплексний підхід, що поєднував анкетування, методи описової статистики та аналіз взаємозв'язків між узагальненими показниками екологічної свідомості та поведінкових намірів.

На першому етапі дослідження був розроблений опитувальник з урахуванням сучасних підходів до оцінювання компонентів екологічної компетентності, що включав чотири блоки чинників: педагогічні, когнітивні, мотиваційні та поведінкові. Кожен пункт оцінювався за п'ятибальною шкалою Лайкерта (від 1 – «повністю не згоден» до 5 – «повністю згоден»). Опитування відносно культури екологічної безпеки проводилося серед студентів третього курсу Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара таких факультетів: фізико-технічного, української й іноземної філології та мистецтвознавства, фізики, електроніки та комп'ютерних систем та механіко-математичного. Загальна вибірка становила 287 респондентів. Усі студенти брали участь в опитуванні добровільно та заповнювали анкету анонімно у форматі онлайн-опитування. Такий склад вибірки дозволяє охопити представників різних освітніх напрямів і забезпечує достатню статистичну достовірність отриманих результатів

Педагогічні чинники блоку В охоплюють особливості організації освітнього процесу та формування екологічно орієнтованого середовища: В1) Викладачі сприяють формуванню екологічно відповідальної поведінки студентів (через приклади, роз'яснення, включення екологічних аспектів у заняття); В2) У навчальному процесі передбачені можливості практичного ознайомлення з питаннями екології чи екобезпеки (тренінги, візні заняття, спостереження); В3) Університет підтримує або популяризує екологічні ініціативи (сортування відходів, енергозбереження, зменшення використання ресурсів); В4) Студенти мають можливість набувати практичних навичок, пов'язаних з екологічною тематикою, через проєктну діяльність, виконання кейсів або участь у практичних завданнях; В5) Навчальні дисципліни, які я вивчаю, містять елементи екологічної тематики або приклади екологічних аспектів у професійній діяльності.

На рисунку 1 наведені результати розподілу балів студентів за педагогічними чинниками В1–В5.

Діаграма показує, що медіани переважно знаходяться на рівні 2,5–3,5, тобто студенти частково згодні з твердженнями. Вуса від 1 до 5, показують широкий розкид думок: деякі студенти повністю не згодні, інші – повністю згодні. Найнижче середнє спостерігається у В4, тобто практична частина В4

потребує посилення, оскільки середні оцінки та розкид свідчать про нерівномірний доступ до практичних завдань.

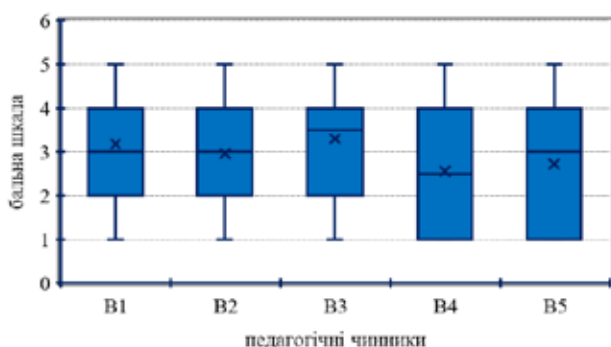


Рис. 1. Розподіл балів студентів за педагогічними чинниками B1–B5

Для показників B2, B4 спостерігається збіг середнього та медіани, що свідчить про симетричний і відносно однорідний розподіл відповідей, тобто студенти дають узгоджені оцінки без різких відхилень. Для показника B1 спостерігається правостороння асиметрія, оскільки середнє значення перевищує медіану. Це свідчить про наявність групи студентів, які оцінюють педагогічну підтримку екологічної поведінки значно вище за інших. Для показників B3 і B5 середнє значення нижче медіани, що вказує на лівосторонню асиметрію. Це говорить про існування групи студентів, які оцінюють екологічну спрямованість університетських ініціатив і наповнення дисциплін екологічним змістом нижче, ніж основна маса респондентів.

Когнітивні чинники блоку С стосувалися рівня екологічних знань і розуміння екологічних ризиків: C1) Я розумію, які основні екологічні ризики існують у сучасному світі; C2) Я можу пояснити, як людська діяльність впливає на стан довкілля; C3) Я обізнаний(а) з основними принципами сталого розвитку та екологічної безпеки; C4) Я розумію наслідки порушення екологічних норм і правил у повсякденному житті; C5) Я вмю визначати екологічно доцільні варіанти поведінки у типових побутових ситуаціях (вода, енергія, відходи); C6) Я відчуваю, що маю достатню інформацію для прийняття екологічно відповідальних рішень.

На рисунку 2 наведені результати розподілу балів студентів за когнітивними чинниками C1–C6.

Розподіл балів на рисунку 2 показує, що когнітивні чинники демонструють загалом стабільний і симетричний розподіл відповідей, що свідчить про однорідний рівень екологічних знань серед студентів. Невеликий зсув середнього нижче медіани для пунктів C1 та C4 свідчить про наявність окремої групи респондентів з нижчими знаннями в цих аспектах. Натомість у пункті C6 середнє трохи вище

медіани, що вказує на групу студентів з високим рівнем впевненості у власній інформованості. Для показників C2, C3 та C5 медіана і середнє практично збігаються, що відображає рівномірність і узгодженість відповідей. Діаграма демонструє, що студенти мають доволі високий рівень екологічної обізнаності, проте присутні помірні коливання між респондентами та окремі низькі значення, які вказують на групу студентів з недостатніми когнітивними компетентностями. Це вказує на потребу підсилення інформування, надання прикладів з реальної практики, систематичного оновлення матеріалів з екобезпеки.

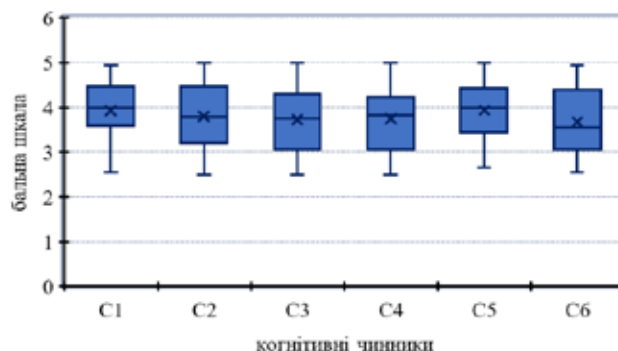


Рис. 2. Розподіл балів студентів за когнітивними чинниками C1–C6

Мотиваційні чинники блоку D відображали цінності, переконання та внутрішні стимули до екологічно відповідальної діяльності: D1) Екологічно відповідальна поведінка є для мене важливою особистою цінністю; D2) Я відчуваю внутрішню мотивацію дотримуватися принципів екобезпеки у повсякденному житті; D3) Я хочу робити свій внесок у зменшення негативного впливу на довкілля; D4) Я готовий(а) змінювати власні звички для покращення стану навколишнього середовища; D5) Участь у екологічних ініціативах (волонтерство, проекти, акції) мені цікава; D6) Я вважаю, що моя поведінка може реально впливати на стан довкілля.

На рисунку 3 наведені результати розподілу балів студентів за мотиваційними D1–D6 чинниками.

Діаграма показує, що медіани переважно знаходяться на рівні 3 та 4, середнє змінюється 2,8-3,5. Мотиваційні чинники демонструють значно більшу варіативність, ніж когнітивні та педагогічні (від 1 до 5). Загалом студенти мають помірний рівень внутрішньої екологічної мотивації, але відповіді виявляють суттєву неоднорідність. Найбільш усталеними є ціннісні орієнтації (D1) та переконання у здатності впливати на довкілля (D6), тоді як найменш стабільним є чинник D3, що відображає низьку готовність до реального екологічного внеску. Медіана та середнє значення для більшості показників є близь-

кими, що свідчить про симетричність розподілу, але наявність окремих груп із низькими оцінками формується у D1, D3 та D6. Це вказує на розрив між визначеними цінностями й готовністю до конкретної екологічної поведінки.

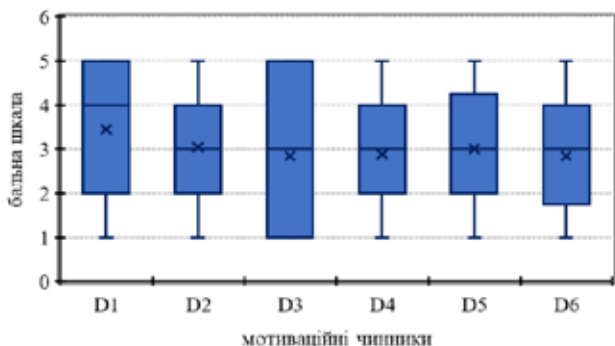


Рис. 3. Розподіл балів студентів за мотиваційними чинниками D1–D6

Поведінкові чинники характеризували реальні дії студентів, спрямовані на дотримання норм екологічної безпеки та мінімізацію впливу на довкілля: E1) Я регулярно сортую побутові відходи (пластик, папір, скло, органіка); E2) Я намагаюся економно використовувати воду (зменшую час користування, не залишаю відкритий кран тощо); E3) Я контролюю споживання електроенергії (вимикаю світло, техніку, використовую енергоощадні лампи); E4) Я уникаю зайвих пластикових виробів (пакетів, одноразового посуду, непотрібних покупок); E5) Я обираю екологічні способи пересування, коли це можливо (пішки, велосипед, громадський транспорт); E6) Я беру участь (або брав/ла участь) у хоча б одній екологічній ініціативі (акції, прибирання, волонтерство, проекти); E7) Я намагаюся купувати екологічні або енергоефективні товари (за можливості); E8) Я звертаю увагу на екологічні наслідки своїх щоденних рішень.

На рисунку 4 наведені результати розподілу балів студентів за поведінковими E1–E8 чинниками.

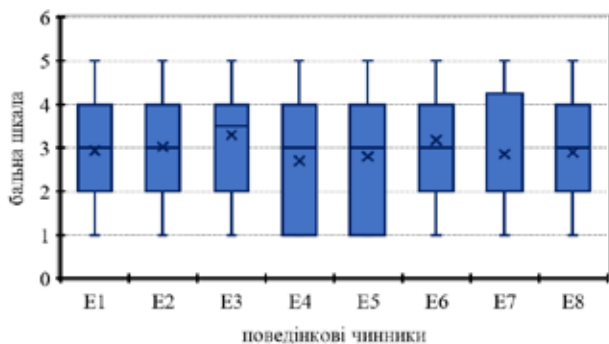


Рис. 4. Розподіл балів студентів за поведінковими чинниками E1–E8

Аналіз діаграми показує, що розподіли усіх восьми поведінкових чинників охоплюють повний діапазон шкали (1–5 балів), однак медіанні значення здебільшого перебувають у межах 3–4 балів, що вказує на середній рівень екологічно свідомої поведінки серед студентів.

Середні значення майже збігаються з медіанами для всіх показників, що свідчить про відносно симетричні розподіли та відсутність суттєвих відхилень. Така структура даних є статистично сприятливою для подальшого застосування кореляційного та регресійного аналізу.

Найбільш сформованими практиками є економія електроенергії (E3), економне використання води (E2) та усвідомленість екологічних наслідків власних рішень (E8) – для них спостерігається вузький міжквартильний діапазон і менша варіативність відповідей.

Натомість найбільш розсіяні розподіли характерні для сортування відходів (E1), уникнення пластику (E4), вибору екологічних способів пересування (E5) та особливо участі в екологічних ініціативах (E6). Це свідчить про те, що частина студентів активно практикує ці дії, тоді як інша група майже не залучена через обмеження інфраструктури, ресурсів чи мотивації. Загалом поведінкові чинники демонструють середній рівень сформованості з вираженою неоднорідністю окремих практичних звичок.

На наступному етапі дослідження для кожного блоку було обчислено інтегральні індекси: педагогічний індекс, когнітивний індекс, мотиваційний індекс та поведінковий індекс, що визначалися як середні значення відповідних груп тверджень. Такий підхід дає змогу розглядати отримані індекси як наближені інтервальні змінні, що відповідає усталеній практиці соціально-педагогічних та екологічних досліджень (рис. 5).

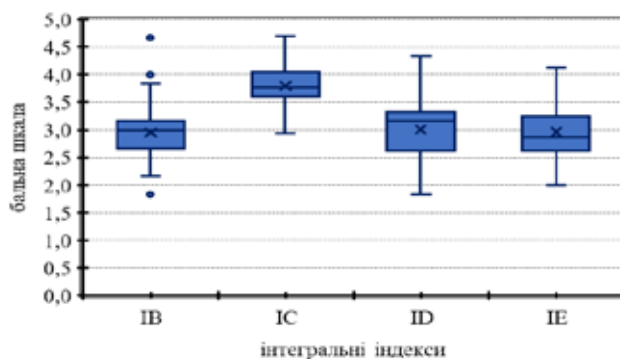


Рис. 5. Розподіл інтегральних індексів: IB – педагогічний; IC – когнітивний; ID – мотиваційний; IE – поведінковий

Розподіл інтегральних індексів показує, що найвищим і найстабільнішим є когнітивний компонент, тоді як педагогічний, мотиваційний і поведінко-

вий індекси демонструють більшу варіативність. Когнітивний індекс (IC) має найвищі значення: медіана близька до 4 балів, а міжквартильний діапазон є порівняно вузьким. Це свідчить про високий рівень екологічної обізнаності студентів і відносну однорідність когнітивних установок.

Педагогічний індекс (IB) характеризується нижчою медіаною та ширшим розкидом значень. Наявність поодиноких викидів свідчить про різний досвід студентів щодо участі в екологічно орієнтованих освітніх практиках. Мотиваційний індекс (ID) демонструє середній рівень сформованості. Медіана наближається до 3 балів, а варіативність є помірною, що вказує на значущі індивідуальні відмінності у мотивації до екологічних дій. Поведінковий індекс (IE) має показники, подібні до мотиваційного, але з дещо нижчими мінімальними значеннями. Це узгоджується з відомою тенденцією: навіть за достатнього рівня знань і мотивації фактична поведінка може бути обмежена зовнішніми умовами, такими як інфраструктура, ресурси, час.

Така структура підтверджує доцільність подальшого кореляційного аналізу для визначення взаємозв'язків між компонентами та оцінки їхнього впливу на поведінковий результат (IE).

Тому на наступному етапі дослідження для перевірки взаємозв'язків між показниками проводився кореляційний аналіз. Він дозволяє визначити силу та напрямок лінійних та нелінійних залежностей між інтегральними індексами педагогічних, когнітивних, поведінкових та мотиваційних чинників. Коефіцієнти кореляції обчислювалися у середовищі MS Excel за допомогою інструменту «Аналіз даних», що забезпечує достатню точність для індексів, сформованих на основі шкали Лайкерта.

Поведінковий індекс (IE) у цьому дослідженні розглядається як залежна змінна  $y(x_i)$ , оскільки він відображає реальні дії та практичний результат екологічно відповідальної поведінки. Це дає змогу оцінити, як на нього впливають ключові освітні механізми та внутрішні чинники: педагогічний індекс (IB) –  $x_1$ , когнітивний індекс (IC) –  $x_2$ , мотиваційний індекс (ID) –  $x_3$ . Такий підхід дозволяє кількісно визначити внесок освітнього середовища, рівня екологічних знань і мотиваційних установок у формування екологічної поведінки студентів.

На основі кореляційного аналізу встановлено, що ступінь кореляції результуючої змінної  $y(x_i)$  з фактор-

ними змінними  $x_1, x_2, x_3$  є різною, але має дуже низький рівень кореляції та мультиколінеарність. Тому при подальшому аналізі було введено нелінійні змінні, а саме комбінації факторних змінних  $t_k = x_i \cdot x_j$ , де  $i, j = 1, 2, 3, 4$  та обрано лише ті варіації, які дають середній рівень кореляції (табл. 1).

Для визначення впливу педагогічних, когнітивних та мотиваційних чинників на екологічно відповідальну поведінку побудовано лінійну регресійну модель, у якій поведінковий індекс обрано як залежну змінну. Обчислення параметрів моделі виконано за допомогою модуля «Регресія» пакету «Аналіз даних» MS Excel.

Результати множинної регресії свідчать про високу якість моделі та суттєвий вплив педагогічних, когнітивних і мотиваційних чинників на поведінковий індекс.

Множинний  $R = 0,896$  означає дуже сильний лінійний зв'язок між поведінковим індексом та трьома предикторами.  $R^2 = 0,803$ , підтверджує, що близько 80,3 % варіації поведінкового індексу (IE) пояснюється сукупною дією педагогічного (BE), когнітивного (CE) та мотиваційного (DE) індексів. Це дуже високий показник для соціально-поведінкових досліджень. Нормований  $R^2 = 0,790$ , після врахування комбінованих факторних змінних модель є стабільною та не переобтяженою. На позитивну значущість рівняння регресії вказує критерій Фішера,  $F_{кр} = 2,93 \cdot 10^{-16}$ , тобто модель є статистично значущою. Імовірність хибності розрахунків обумовлюється  $P$ -значеннями, які змінюються в діапазоні  $[1,05 \cdot E-08; 0,0164]$ , тобто ризик помилки складає 1,64 %. Отримані коефіцієнти регресії, показують, що найбільший вплив має когнітивний індекс (CE),  $a_2=0,140825$ , тобто знання про екологічні проблеми і розуміння екологічних наслідків є ключовим чинником, який визначає реальну поведінку. На другому місці – мотиваційний індекс (DE),  $a_3=0,053677$ , мотивація підсилює вплив знань та педагогічного середовища. Найменший, але все ще значущий внесок – педагогічний індекс (BE),  $a_1=0,048282$ , освітні практики формують базу, але впливають менше, ніж знання та внутрішня мотивація.

Математична модель рівняння множинної регресії, що визначає зв'язок між факторними змінними  $t_1, t_2, t_3$  та результуючим показником  $y(t_k)$ ,  $k=1,2,3$  набула наступного виду:

Таблиця 1

Коефіцієнти кореляції між факторними змінними та результуючою ознакою

	$t_1 = IB \cdot IE$	$t_2 = IC \cdot IE$	$t_3 = ID \cdot IE$	$y(t_k) = IE$
$t_1 = IB \cdot IE$	1			
$t_2 = IC \cdot IE$	0,48573	1		
$t_3 = ID \cdot IE$	0,48096	0,73073	1	
$y(t_k) = IE$	0,53238	0,84374	0,719485	1

$$y(t_k) = a_0 + a_1 \cdot t_1 + a_2 \cdot t_2 + a_3 \cdot t_3, \quad (1)$$

де  $t_1$  – педагогічно-поведінковий індекс;  $t_2$  – когнітивно-поведінковий індекс;  $t_3$  – мотиваційно-поведінковий індекс. Відповідні коефіцієнти регресії:  $a_0=0,477554$ ,  $a_1=0,048282$ ,  $a_2=0,140825$ ,  $a_3=0,053677$ .

Для оцінки об'єктивності числових розрахунків  $y_1(t_k)_{\text{розрах.}}$ , отриманих на основі кореляційно-регресійної математичної моделі, було визначено відносну похибку між розрахунковими значеннями та теоретичними (вихідними) даними. Середнє значення похибки становить 5,3 %, а максимальне значення – 9,3 %. Це свідчить про високу збіжність модельних та емпіричних даних. Таким чином, побудована математична модель (1) з точністю 90,7 % адекватно відображає зв'язок між вихідними параметрами та результуючим показником, що підтверджує її коректність, надійність та придатність до подальших прикладних розрахунків.

**Головні висновки.** Аналіз «коробок з вусами» показав, що як педагогічні, когнітивні, мотиваційні, так і поведінкові чинники мають достатню варіативність та помірну асиметрію розподілів. Значення медіани та розмаху засвідчили неоднорідність відповідей студентів, що свідчить про різний рівень сформованості екологічних установок і дає статистичне підґрунтя для подальшого кількісного аналізу.

Інтегральні індекси (педагогічний, когнітивний, мотиваційний і поведінковий) виявили різний рівень екологічної компетентності. Найвищі значення спостерігаються для когнітивного індексу, що свідчить про достатні знання студентів. Натомість мотиваційний і поведінковий індекси є нижчими, що вказує на існування розриву між обізнаністю та реальними екологічними діями.

Кореляційний аналіз підтвердив, що комбінації інтегрованих індексів взаємопов'язані. Це свідчить про системний характер формування екологічних намірів та узгоджується з сучасними моделями екоповедінки.

Регресійна модель показала високу пояснювальну здатність ( $R^2=0,803$ ), що вказує на те, що 80,3% варіації поведінкового індексу зумовлені педагогічними, когнітивним та мотиваційним чинниками. Найпотужніший внесок має когнітивно-поведінковий і мотиваційно-поведінковий індекси, тоді як педагогічно-поведінковий впливає опосередковано, але статистично значимо. Невелика середня похибка моделі ( $\approx 5\%$ ) підтверджує її надійність і практичну адекватність.

**Перспективи використання результатів досліджень.** Встановлені зв'язки між педагогічними, когнітивними, мотиваційними та поведінковими чинниками дають змогу цілеспрямовано коригувати зміст дисциплін екологічного спрямування.

Інтегральні індекси (педагогічний, когнітивний, мотиваційний, поведінковий) можуть стати практичним інструментом для моніторингу екологічної компетентності студентів у ЗВО, для оцінки ефективності впроваджених освітніх заходів та порівняння різних груп або навчальних програм.

На основі результатів регресійної моделі можна створювати навчальні методики, тренінги, спрямовані на підвищення мотивації і зміцнення когнітивного компонента, як основних складових екологічно відповідальної поведінки.

Отримана модель може бути розширена за рахунок включення соціально-демографічних чинників, порівняння різних спеціальностей або закладів освіти, аналізу динаміки у часі для глибшого розуміння механізмів формування екологічної поведінки.

## Література

1. Царенко І.Л., Богомаз-Назарова С.М. Формування екологічної культури студентів при вивченні профільних дисциплін. *Наукові записки. Серія: Педагогічні науки*. 2018. № 2(173). С. 225–228. URL: <https://pednauk.cusu.edu.ua/index.php/pednauk/article/view/349> (дата звернення: 12.11.25).
2. Блискун О.О. Дослідження проблем сучасної молоді: соціологічні та психологічні аспекти. *Актуальні проблеми психології: збірник наукових праць Інституту психології імені Г.С. Костюка НАПН України*. 2020. Т. IX, Вип. 13. С. 26–37. URL: <http://www.apppsychology.org.ua/data/jrn/v9/i13/5.pdf> (дата звернення: 14.11.25).
3. Вініченко А.А. Формування ціннісних орієнтацій у студентів закладів вищої освіти у сучасному соціокультурному просторі. *Вісник післядипломної освіти. Серія «Педагогічні науки»*. 2017. Вип. 4. С. 24–32. URL: [http://umo.edu.ua/images/content/nashi\\_vydanya/visnyk\\_po/4\\_33\\_2017/висник\\_4\\_33\\_2017\\_педагогика\\_виніченко.pdf](http://umo.edu.ua/images/content/nashi_vydanya/visnyk_po/4_33_2017/висник_4_33_2017_педагогика_виніченко.pdf) (дата звернення: 12.11.25).
4. Молчанюк О.В. Гармонійна взаємодія людини та природи як основа виховання в особистості ціннісного ставлення до природи. *Духовність особистості: методологія, теорія і практика*. 2019. Вип. 1(88). С. 98–113. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/domtr\\_2019\\_1\\_12](http://nbuv.gov.ua/UJRN/domtr_2019_1_12) (дата звернення: 13.11.25).
5. Ayubova I.H. Systems for formation of environmental safety culture in students at technical higher educational institutions. *International journal of psychosocial rehabilitation*. 2020. Vol. 24, Issue 06. С. 490–498. URL: [https://www.psychosocial.com/index.php/ijpr/article/download/6234/5643/11350?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.psychosocial.com/index.php/ijpr/article/download/6234/5643/11350?utm_source=chatgpt.com) (date of access: 15.11.25).
6. Pedagogical requirements for developing a culture of environmental safety among students in the educational space of higher education institutions / I. Dzhakupova, A. Bozhbanov, E. Assembayeva, S. Almagambetova, Z. Sadykova. *Scientific Herald of Uzhhorod University. Series "Physics"*. 2024. № 55. P. 1640–1649. URL: <https://doi.org/10.54919/physics/55.2024.164ak0> (date of access: 15.11.25).
7. Impact of Ecological Education on University Students' Environmentally Sustainable Behavior—Evidence from China. / W. Hou et al. *Sustainability*. 2025. № 17(13). P. 6051. URL: <https://doi.org/10.3390/su17136051> (date of access: 16.11.25).

8. Students' safety culture at tertiary level academic institutes in Bangladesh: A cross-sectional study / A.H.M. Ahsan et al. *Heliyon*. 2024. № 10(22). P. e40155. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40155> (date of access:16.11.25).
9. Increase of global DNA methylation patterns in beauty salon workers exposed to low levels of formaldehyde / E. Barbosa et al. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018. Vol. 26, № 2. P. 1304–1314. URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3674-7> (date of access:18.11.25).
10. Environmental behavior of university students / D.M. Torroba et al. *International Journal of Sustainability in Higher Education*. 2023. Vol. 24, № 7. P. 1489–1506. URL: <https://doi.org/10.1108/IJSHE-07-2022-0226> (date of access:20.11.25).
11. Wang K., Zhang L. The impact of ecological civilization theory on university students' pro-environmental behavior: An application of the knowledge-attitude-practice theoretical model. *Frontiers in Psychology*. 2021. № 12. P. 681409. URL: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.681409> (date of access:26.11.25).
12. Al-Naqbi A.K., Alshannag Q. The Status of Education for Sustainable Development and Sustainability Knowledge, Attitudes, and Behaviors of UAE University Students. *International Journal of Sustainability in Higher Education*. 2018. № 19. P. 566-588. URL: <https://doi.org/10.1108/IJSHE-06-2017-0091> (date of access:02.10.25).
13. Ecological education and its relationship with students' health / H.P. Hryban, I.M. Okhrimenko, M. Myroshnychenko, M.M. Rogovenko. *Wiadomości Lekarskie*. 2022. № 75(2). P. 525–532. URL: <https://doi.org/10.36740/WLek202202136> URL: <https://repo.knmu.edu.ua/handle/123456789/30889> (date of access:02.12.25).
14. Томчук М., Томчук С. Розвиток екологічної свідомості студентів інформаційними засобами. *Науковий вісник Вінницької академії безперервної освіти. Серія «Педагогіка. Психологія»*. 2022. № 1. P. 39–50. URL: <https://doi.org/10.32782/academped.psyh-2022-1.07> (date of access:02.12.25).
15. Yarovenko S., Ploshchenko Y. Youth and the environment: Are knowledge levels sufficient for ecological awareness? *International Science Journal of Education & Linguistics*. 2023. № 2(3). P. 23–35. URL: <https://doi.org/10.46299/j.isjel.20230203.04> (date of access:02.12.25).

Дата першого надходження статті до видання: 02.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026

---

# ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ

---

УДК 502/504:551.435.11(477.41)

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.1-64.26>

## МОНІТОРИНГ ПРОЦЕСІВ ЕВТРОФІКАЦІЇ У ЗАТОПЛЕНІЙ ДОЛИНІ Р. ІРПІНЬ МЕТОДАМИ ДЗЗ

Ладика М.М., У Жофань

Національний університет біоресурсів і природокористування України  
вул. Героїв Оборони, 15, 03041, м. Київ  
[mm.ladyka@gmail.com](mailto:mm.ladyka@gmail.com)

В результаті затоплення долини річки Ірпінь у лютому 2022 року, як прямий наслідок руйнування гідротехнічної споруди, сформувалося нове водне середовище. Воно є яскравим прикладом антропогенно трансформованої екосистеми із кардинально порушеним природним річковим гідрологічним режимом, що спричинило інтенсивні процеси евтрофікації.

Водночас, ця водойма з часом перетворилася на осередок існування водно-болотного біорізноманіття. Прибережна та водна рослинність, а також пов'язані з нею види тварин, які заселили затоплені ділянки, почали відігравати активну участь у формуванні її екологічного стану, впливаючи на трофічні характеристики.

Метою дослідження є моніторинг процесів евтрофікації у затопленій долині р. Ірпінь на основі мультисенсорних даних дистанційного зондування Землі (Sentinel-2B L2A MSI та Sentinel-1 SAR) з подальшим визначенням трофічного статусу водойми та динаміки його змін у часі і просторі. Проаналізовано основні ключові дати вегетаційного періоду за 2022-2025 рр.

Встановлено, що після первинного евтрофічного шоку екосистема пройшла етап часткової стабілізації та до 2025 р. закріпилася у відносно постійному мезотрофному стані, який складав від 66% до 99% площі водної поверхні. Проте, виявлено значну просторову неоднорідність із формуванням стійких локальних осередків підвищеної трофності, чітко пов'язаних із зонами з порушеним гідрологічним режимом (переважно це територія покритої водою заплави).

Ключовим етапом є виявлення тенденції до збільшення площ, охоплених евтрофікацією. Зокрема, у 2024 р. її частка становила 11% (103,5 га), а восени 2025 року вона зросла до 34% (353,7 га), що свідчить про посилення антропогенного навантаження та недостатність механізмів самоочищення екосистеми. Встановлено, що проява цього процесу має виражений сезонний характер із регулярним підвищенням значень трофічного індексу TSI в кінці літа – на початку осені. *Ключові слова:* евтрофікація, дистанційне зондування Землі (ДЗЗ), індекс трофічного статусу TSI, річка Ірпінь, екологічний моніторинг, якість води, космічні знімки.

### Monitoring Of Eutrophication Processes in the Flooded Irpin River Valley by Remote Sensing Methods. Ladyka M., Wu Ruofan

A new aquatic environment was formed as a result of the flooding of the Irpin River Valley in February 2022. It is a vivid example of an anthropogenically transformed ecosystem with a radically disrupted natural river hydrological regime, which caused intensive eutrophication processes.

At the same time, this water body became a habitats for a diverse range of wetland species. Coastal and aquatic vegetation and associated animal species, which have settled in the flooded areas, have begun to play an active role in forming the ecological state of this territory, influencing on its trophic characteristics.

The study aims to monitor eutrophication processes in the flooded Irpin River Valley based on multisensor Earth remote sensing data (Sentinel-2B L2A MSI and Sentinel-1 SAR) with subsequent determination of the trophic status of the water and the dynamics of its spatio-temporal changes. The main key dates of the vegetation season of 2022-2025 were analysed.

It was found that after the initial eutrophic shock, the ecosystem underwent a stage of partial stabilisation and for 2025 was established in a relatively constant mesotrophic state. From 66% to 99% of the water surface was comprised of it.

However, significant spatial heterogeneity was found with the formation of the stable local foci of increased trophicity. They are related to zones with a disturbed river hydrological regime (mainly the river floodplain, covered with water).

Also, the identification of the trend towards the expansion of the area covered by eutrophication was the key stage of this investigation. In particular, in 2024 its part was 11% (103.5 ha), and in the autumn of 2025 it increased to 34% (353.7 ha). This is evidence of the rise of the anthropogenic load on the water ecosystem and insufficiency of the ecosystem's self-cleaning mechanisms.

It has been established that the manifestation of the eutrophication process has a pronounced seasonal character. Trophic index TSI is regularly increase in late summer – early autumn period. *Key words:* eutrophication, remote sensing, Earth observation (EO), trophic state index (TSI), Irpin River, environmental monitoring, water quality, satellite imagery.

**Постановка проблеми.** Евтрофікація водних екосистем є однією із екологічних проблем, що призводить до погіршення якості поверхневих вод. Її прояви свідчать про серйозні порушення обміну речовин у водних об'єктах, особливо в умовах посиленого антропогенного впливу, обумовленого заре-



© Ладика М.М., У Жофань, 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

гулюванням стоку й трансформацією природного водного режиму та кліматичних змін. Надходження у воду надлишку біогенних елементів (азоту і фосфору) зумовлює інтенсивний розвиток одноклітинних водоростей та макрофітів, порушення трофічної структури й деградацію гідроекосистеми [1-3].

Затоплена долина річки Ірпінь є типовим прикладом природно-антропогенної екосистеми, яка зазнала істотних змін внаслідок воєнних дій, впливу селітебних територій, інтенсивної сільськогосподарської діяльності на прибережній території та природних біологічних процесів [4-6]. В таких умовах евтрофікаційні процеси мають чітко виражену просторово-часову мінливість, що ускладнює їх оцінку традиційними методами спостережень.

Польові експедиційні дослідження із визначенням гідрохімічних і гідробіологічних показників дають можливість отримати детальну інформацію про стан водної екосистеми в певних реперних пунктах спостережень. Однак, вони є обмеженими за просторовим охопленням, що ускладнює оперативний моніторинг евтрофікації у важкодоступних ділянках та на великих територіях. Це обумовлює необхідність використання методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) у моніторингу водних об'єктів [7].

Ці методи базуються на застосуванні супутникових знімків й дозволяють здійснювати регулярний просторово-часовий моніторинг об'єктів довкілля. Використання спектральних характеристик води, які змінюються залежно від вмісту хлорофілу-а в одноклітинних водоростях, каламутності, розчиненої органічної речовини та поширення прибережної і водної рослинності дає можливість відслідковувати просторове поширення евтрофікаційних процесів [8].

**Актуальність дослідження.** У березні 2022 року, внаслідок стратегічного рішення українських військових щодо формування природної перешкоди з метою оборони Києва, було зруйновано Козаровицьку дамбу. Вона відмежовує долину річки від Київського водосховища (відмітки урізу води якого більше ніж на 5 м вище відміток висот самої заплави). Під водою опинилося понад 2,5 тис. га території, з яких 94% становили сільськогосподарські угіддя. Наразі ця площа, згідно офіційними даними, скоротилася до 1,7 тис. га [4; 5].

За останні чотири роки місцеве населення й природа адаптувалися до нових реалій. Нині на узбережжі спостерігаються інтенсивні сільськогосподарські практики з вирощуванням кукурудзи, соняшнику, сої, озимої пшениці. А безпосередньо затоплена територія стала середовищем існування різних водно-болотних птахів [9]. Змив сполук азоту і фосфору з полів, накопичення продуктів життєдіяльності колоній орнітофауни, уповільнений водний режим та підвищення температури в комплексі сприяють розвитку евтрофікації водойми.

Найінтенсивніше ці процеси проявляються у слабопроточних умовах і мілководних ділянках новоствореної акваторії.

Поліпшення якісного стану водних об'єктів є однією із стратегічних цілей Водної стратегії України на період до 2025 року [10]. Своєчасне виявлення ознак «цвітіння» води відіграє важливе значення для збереження біорізноманіття, забезпечення і підтримання якості водних ресурсів й прийняття обґрунтованих рішень на засадах сталого управління водними ресурсами.

Використання сучасних методів ДЗЗ в сьогодення набуває особливої актуальності у контексті розробки інтегрованих систем моніторингу, що відповідають світовим підходам до управління водними ресурсами [11; 12]. Застосування супутникових оптичних та радарних знімків дає можливість оперативно відслідковувати зміни гідрологічних об'єктів (кількісні і якісні), здійснювати повторювані й великомасштабні спостереження із низькими економічними витратами.

Отже, дане дослідження є релевантним з наукової і практичної точок зору й сприятиме формуванню сучасної інформаційної бази та методологічних підходів щодо оцінки трансформованих прісноводних водойм.

**Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.** Публікацію підготовлено в рамках науково-дослідної роботи «Розробка заходів відновлення наземних екосистем, постраждалих внаслідок російської воєнної агресії» (№ держреєстрації 0124U000960), яка полягає у комплексній оцінці порушень, що відбулися внаслідок воєнних дій в екосистемах Київської області.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблема евтрофікації водойм і водотоків є однією із ключових загроз екологічній безпеці поверхневих водних об'єктів. Цьому питанню присвячено значну кількість наукових праць як вітчизняних, так і зарубіжних дослідників.

Панасюк А. О. [13] зазначає, що закордонні учені, вивчаючи водойми різних кліматичних зон, виділяють такі основні ключові фактори, які зумовлюють інтенсивний розвиток мікроводоростей і ціанобактерій – надлишок поживних біогенних речовин, підвищена температура навколишнього середовища та, переважно, лімнофільні умови з уповільненим водним режимом. Слід відмітити, що результати науковців України, які займаються даною проблематикою, підтверджують ці узагальнення. Ця проблема нині є актуальною для усіх водних об'єктів України, які під впливом антропогенного тиску й кліматичних змін деградують [14].

Аналіз і систематизація опублікованих наукових результатів дали можливість виокремити основні тематичні напрямки та часові періоди досліджень басейну річки Ірпінь та її приток [15; 16]: антропогенний вплив (меліорація, воєнні дії, забудова

заплави, сільськогосподарська діяльність та ін.), забруднення води і ґрунту, стан біорізноманіття тощо. Окремим етапом є вивчення наслідків затоплення долини в результаті воєнних дій й формування нової, штучно зміненої екосистеми, що стало об'єктом особливої уваги гідрохіміків, гідробіологів та екологів.

Слід відмітити значний науковий внесок фахівців Інституту гідробіології НААН у вивченні середніх і малих водотоків та проведенні гідробіологічного моніторингу. Зокрема, Шевченко Т. Ф., Ключенко П. Д. та Серeda Т. М. [17] ще до початку вторгнення військ російської федерації вивчали питання річної динаміки й екологічних характеристик фітопланктону в р. Ірпінь. За результатами проведеної біоіндикаційної експертизи вони відзначили, що у воді переважали організми, які переносять підвищені концентрації органічно зв'язаного азоту (76,9%) – нітроген-автрофні таксони (*Aulacoseira granulata*, *Aulacoseira italica* (Ehrenb.) Simonsen, *Asterionella formosa* та ін.). Також було зафіксовано організми  $\beta$ -мезосапробіонти, які є індикаторами органічного забруднення. Ними встановлено, що у літній та ранньоосінній періоди кількісні показники біомаси фітопланктону (2,193-5,146 мг/дм<sup>3</sup>) відповідали евтрофному стану водойми.

Шевченко Т. Ф., та Серeda Т. М. та ін. [18] дослідили, що внаслідок мілітарного впливу на цю територію збільшилися кількість видів (із 121 до 132), максимальна чисельність і біомаса фітопланктону. Також внаслідок порушення гідроморфологічних умов та додаткового надходження поживних речовин із затоплених територій в гирловій частині річки зросла частка синьо-зелених водоростей, які викликають цвітіння води.

Незбрицька І., Білоус О. Серeda Т. та ін. [19] проаналізували питання антропогенного впливу, пов'язаного із війною, на мікрowodорості, макрофіти та бентосні угруповання у водній екосистемі р. Ірпінь. Результати польових та експериментальних робіт, проведених у 2023 р., засвідчили, що на ділянках із значними гідроморфологічними змінами (зона затоплення) значення хлорофілу у товщі води були дуже високими (59-106 мкг/дм<sup>3</sup>). Також прослідковувалося збільшення чисельності та біомаси водоростей й індексу сапробності. Авторами відмічено, що тривале затоплення і значне коливання рівня води значно вплинуло на структуру водоростей і макрофітного комплексу річки. Зокрема, в пункті спостережень, розташованому в околицях с. Демидів, помітно зросла кількість занурених макрофітів.

Тісно пов'язаним із евтрофікацією водойми питанням є зміна якості води. Вивчення комплексу факторів дає можливість відслідкувати причинно-наслідкові зв'язки її прояву. У нашій попередній публікації [20] представлено порівняння якості води Ірпеня між періодами до- та після воєнних дій. Для аналізу було використано комплексний екологіч-

ний індекс (ІЕ) за результатами якого зафіксовано зниження якості води в річці в сучасний період. Основною причиною погіршення якісних показників водного середовища є збільшення рівня забруднення сполуками азоту і фосфору. Висока температура повітря і води влітку у поєднанні із високим вмістом біогенів призводить до дефіциту розчиненого кисню ( $\leq 4$  мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>) і порушення природного екологічного балансу в річці. Також погіршуються й трофо-сапробіологічні показники у напрямку евтрофності. За якісними показниками вода відносилася до II-III класу і залежала від специфіки антропогенного навантаження на досліджуваній території. Дана оцінка підтверджується результатами, висвітленими у працях інших авторів [21].

Нині в зарубіжній науковій літературі активно розвиваються підходи до моніторингу евтрофікації із використанням методів ДЗЗ та штучного інтелекту. Вони засвідчують високу інформативність супутникових даних для оцінки прозорості і каламутності води, розчинених органічних речовин, поширення макрофітів, одноклітинних водоростей та скупчення ціанобактерій [22-24]. З цієї метою використовують космічні знімки з супутників з високою роздільною здатністю Landsat, Sentinel, PlanetScore [25-28]. Вони дають можливість здійснювати просторово-часовий аналіз визначених параметрів водного середовища та оцінювати зміну трофічного статусу водойми.

Супутникові методи дослідження та ГІС все ширше використовуються українськими науковцями для проведення якісного аналізу змін екологічного стану водойм. Вони дають можливість інтегрувати різномірну інформацію, здійснювати аналіз просторових закономірностей і регулярний моніторинг досліджуваних територій [29-33].

Хоча методи ДЗЗ і є потужним інструментом для оцінки екологічного стану водних екосистем, їх потенціал для моніторингу трофічного статусу новоутворених водно-болотних угідь в затопленій долині р. Ірпінь є недостатньо вивченим. Тому подальші дослідження мають бути спрямовані на апробацію та адаптацію алгоритмів ДЗЗ для цієї території. Це надасть можливість створити ефективну систему моніторингу та стане основою для формування науково обґрунтованих і екологічного збалансованих рішень щодо управління новоствореними природними комплексами та водними ресурсами басейну річки.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** Метою даної наукової роботи є моніторинг процесів евтрофікації у затопленій долині р. Ірпінь на основі мультисенсорних даних дистанційного зондування Землі (Sentinel-2B L2A MSI та Sentinel-1 SAR) з подальшим визначенням трофічного статусу водойми та динаміки його змін в часі і просторі.

**Новизна.** Наукова новизна представленої праці полягає у вперше здійсненій оцінці процесів прояву

евтрофікації в затопленій долині р. Ірпінь з використанням методів та індексів дистанційного зондування із урахуванням просторово-часових змін гідроекологічних показників.

#### Методологічне або загальнонаукове значення.

Методологічне значення дослідження полягає у розвитку та адаптації підходів ДЗЗ до моніторингу процесів евтрофікації у складних умовах трансформованих річкових екосистем із використанням багатоспектральних супутникових даних як ефективного інструменту оцінки трофічного статусу.

**Викладення основного матеріалу.** *Загальна характеристика досліджуваної території.* Середня річка Ірпінь є правою притокою Дніпра довжиною 162 км. Її басейн розташований у межах Житомирщини (Бердичівський і Житомирський райони) та Київщини (Бучанський, Фастівський і Вишгородський райони). Загальна площа водозбору налічує 3340 км<sup>2</sup> або 334 тис. га. Долина річки має коритоподібну форму шириною до 4 км й глибиною до 40 м. Річка впадає у Київське водосховище, яке на 5-8 м (залежно від наповнення) вище за відмітки висот заплави. З метою захисту цієї території від затоплення водосховищем у гирловій частині побудовано захисний масив «Захист заплави р. Ірпінь»

площею 20,5 тис. га. Основним гідротехнічними спорудами його є Козаровицька дамба і збудована в її тілі Ірпінська насосна станція, яка перекачує воду з річки. Річкова заплава шириною до 1,5 км, осушена. Тут створено Ірпінську осушувально-зволожувальну меліоративну систему загальною площею 8,2 тис. га [34]. З 2022 року гирлова частина долини є затопленою внаслідок воєнних оборонних дій.

Наше дослідження охоплює саме територію затоплення (рис. 1). Її переважна частина локалізується в околицях селищ Демидів і Козаровичі Вишгородського району Київської області.

*Матеріали та методи досліджень.* Для аналізу використано відкриті дані дистанційного зондування Землі (радарні та мультиспектральні космічні знімки) Sentinel-1 SAR та 2 Sentinel-2B L2A MSI, завантажені з веб-сайту Copernicus Browser Європейського космічного агентства (ESA) (<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>). Для знімків Sentinel-2B застосовано критерій хмарності менше 10%. Усі дані комплектувалися в єдиній координатній системі WGS84/UTM 36N EPSG: 32636. Обрано дати вегетаційного періоду (квітень-вересень) 2022-2025 рр.: 05.05.2022, 25.08.2022, 21.03.2023, 15.08.2023, 27.09.2023, 09.04.2024, 28.06.2024,

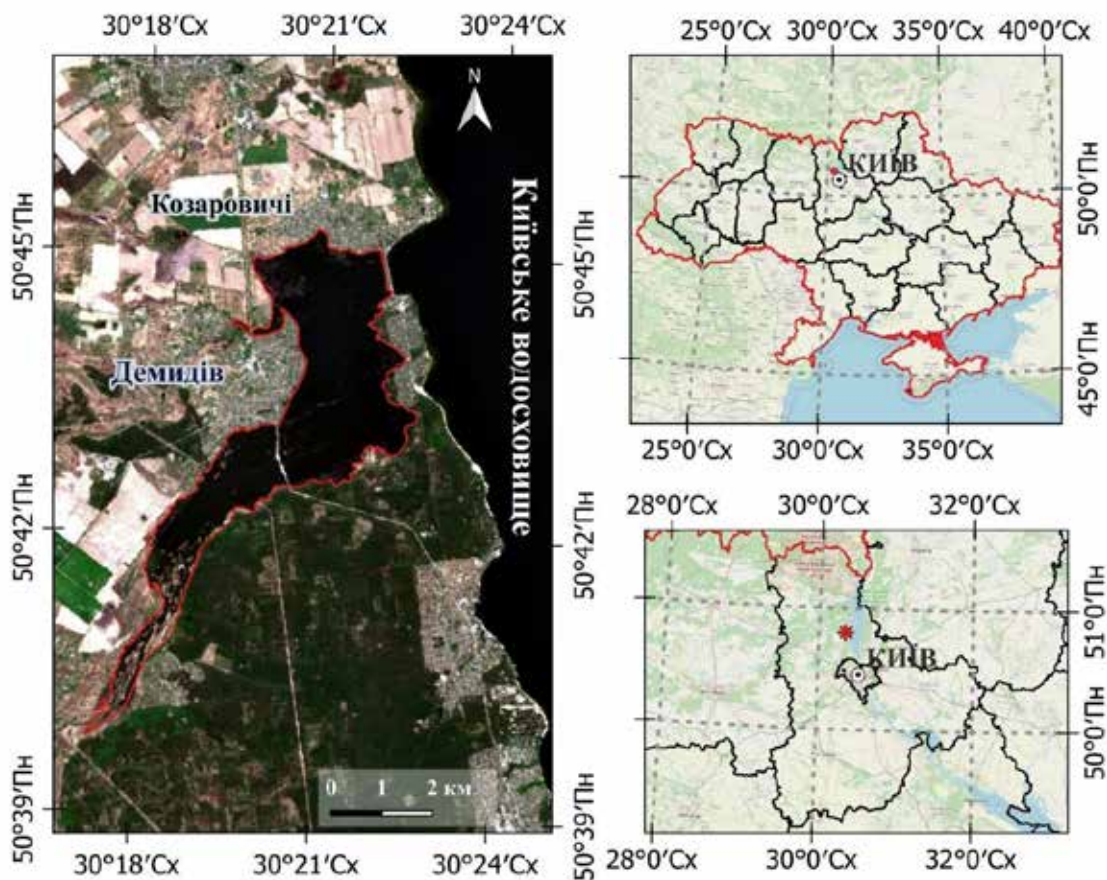


Рис. 1. Просторове розміщення території дослідження (укладено авторами з використанням космічного знімку Sentinel-2B L2A (ESA), композит True color, 21.04.2025 р. та Open Street Map в середовищі QGIS 3.40.14 LTR)

27.08.2024, 21.09.2024, 20.03.2025, 25.04.2025, 30.08.2025, 23.09.2025.

Подальший аналіз виконано у відкритому крос-платформенному ГІС-середовищі QGIS 3.40.14 LTR. Було обчислено індекси MNDWI, NDVI, NDTI і SABI, вміст хлорофілу-а та трофічний статус водойми.

З метою виділення фактичної водної поверхні та усунення негативного впливу суходолу на подальші розрахунки застосовано водну маску з використанням індексу MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) (модифікований нормалізований індекс водності) [35]:

$$\text{MNDWI} = (B3 - B11) / (B3 + B11),$$

де B3 – зелений (560 нм), а B11 – короткохвильовий інфрачервоний (1610 нм) спектральні канали.

Він є ефективним для заплачних і мілководних територій.

Надалі здійснено перекласифікацію отриманого індексу в бінарну маску  $\text{MNDWI} > 0$ , що безпосередньо відображає водну поверхню.

Окрім того, здійснювали фільтрацію растрового зображення за індексом NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (нормалізований вегетаційний індекс) [36]:

$$\text{NDVI} = (B8 - B4) / (B8 + B4),$$

де B8 – інфрачервоний (842 нм), а B4 – червоний (665 нм) спектральні канали.

При цьому витримували умову  $\text{NDVI} < 0,2$ . Така маска дала можливість додатково виключити суходіл і щільну рослинність з водних пікселів.

Для підвищення точності дешифрування меж водної поверхні до комбінованої маски на основі MNDWI та NDVI були інтегровані радіолокаційні дані Sentinel-1 SAR (канал VV-поляризації). Пікселі зі значенням коефіцієнта зворотного розсіювання менше -17 dB класифіковані як водна поверхня. Застосування цього додаткового критерію значно підвищило надійність виділення акваторії на ділянках, де традиційні оптичні методи є неефективними через щільну хмарність і густу прибережну рослинність (кущі, очерет).

Важливим екологічним параметром, який використовується у процесі визначення якості води є індекс NDTI (Normalized Difference Turbidity Index) (індекс каламутності) [37].

$$\text{NDTI} = (B4 - B3) / (B4 + B3)$$

де B3 – зелений (560 нм), а B4 – червоний (665 нм) спектральні канали.

Він відображає каламутність води, яка, переважно, обумовлена наявністю у воді зважених наночастинок й характером життєдіяльності організмів.

Виявлення поверхневих скупчень мікроводоростей здійснювали з використанням індексу SABI (Surface Algal Bloom Index) (індекс поверхневого цвітіння водоростей) [38]:

$$\text{SABI} = (B8 - B4) / (B2 + B3),$$

де B8 – інфрачервоний (842 нм), B4 – червоний (665 нм), B2 – синій (490 нм) і B3 – зелений (560 нм) спектральні канали.

Індекс є ефективним для аналізу проявів евтрофікації у внутрішніх водоймах та прибережних зонах. Аналіз проводився виключно в межах уточненої маски, що забезпечило коректне виявлення зон «цвітіння» у водоймі.

На основі визначеного індексу SABI емпірично обчислювали вміст хлорофілу-а ( $\text{мкг/дм}^3$ ). За основу використано формулу, запропоновану Lai Y. and all [39]:

$$\text{Chl-a} = 14,29 \times \text{SABI} + 5,94$$

Для кількісної оцінки ступеня евтрофікації води використано Індекс трофічного статусу (TSI), запропонований Робертом Е. Карлсоном (Carlson, 1977) [40]. Цей індекс дозволяє класифікувати водойми за ступенем продуктивності на основі концентрації хлорофілу-а.

Розрахунок виконували за формулою:

$$\text{TSI} = 30,6 + 9,81 \times \ln(\text{Chl-a}),$$

де Chl-a – концентрація хлорофілу-а, визначена на основі супутникових даних,  $\text{мкг/дм}^3$ .

Згідно з шкалою Карлсона, значення TSI інтепртуються як: 0-40 – оліготрофний, 40-50 – мезотрофний, 50-70 – евтрофний, >70 – гіпертрофний стан.

Вивчення сучасного екологічного стану трансформованого водного середовища долини р. Ірпінь розпочато нами восени 2022 року. Проведення польових експедиційних спостережень дало можливість візуально оцінити прямі та опосередковані наслідки затоплення для довкілля. Протягом останніх двох років в літній і осінній періоди ми спостерігали прояви евтрофікації в новоствореній акваторії (рис. 2). Візуальні ознаки «цвітіння» водойми, зафіксовані під час експедицій, отримали своє просторове підтвердження та кількісну оцінку завдяки подальшому аналізу супутникових даних.

Важливим показником в оцінюванні якості води є її каламутність. Це показник, який характеризує наявність у ній зважених частинок органічного і мінерального походження (мулу, глини, піску, органічних решток, водоростей, мікроорганізмів тощо). Наявність завислих речовин у водній товщі знижує проникність світла та погіршує фотосинтез у водоймі, водночас може свідчити про скупчення одноклітинних водоростей, що викликають її цвітіння.

Згідно результатів наших польових та лабораторних досліджень протягом 2023-2025 рр., каламутність води в зоні затоплення коливалася від 0,13 до 21,6 НОК й у середньому становила  $6,35 \pm 1,04$  НОК. Це слабо каламутні (по нижньому діапазону) та каламутні (по верхньому діапазону середніх зна-

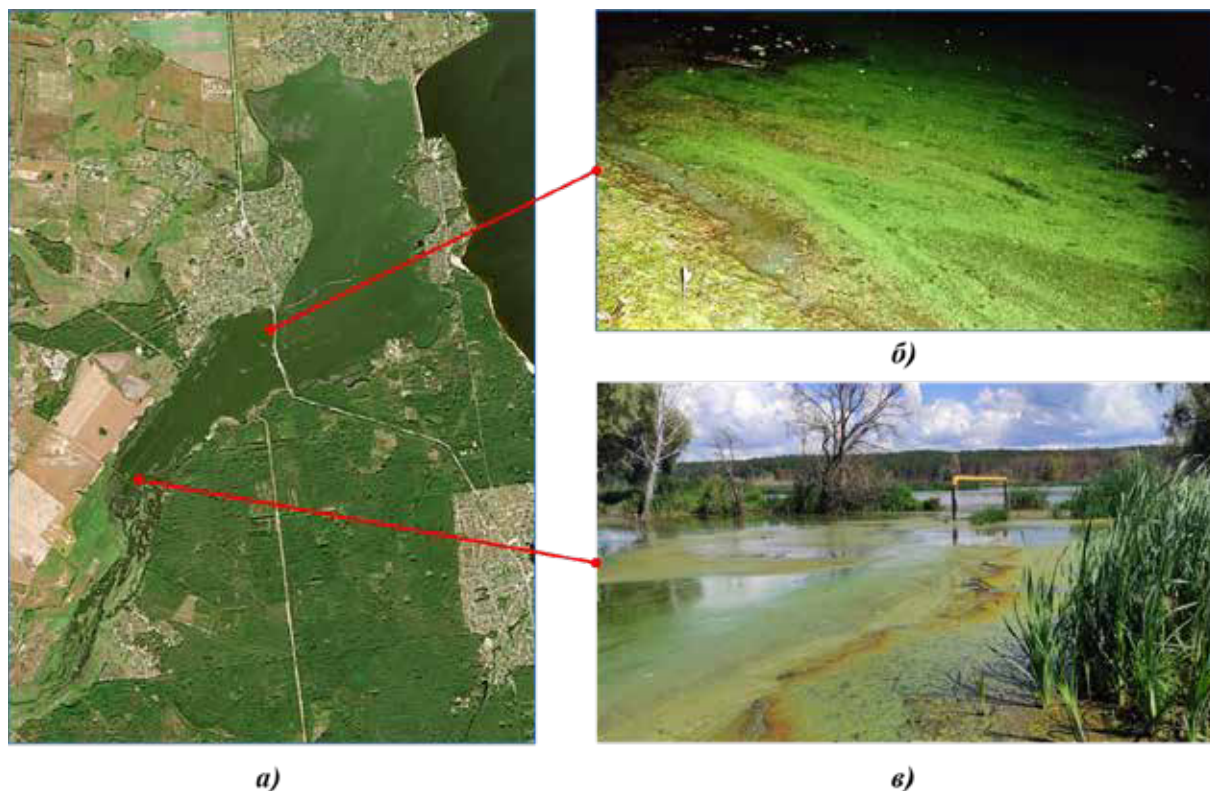


Рис. 2. Прояви евтрофікації в затопленій долині р. Ірпінь (а – візуалізація на космічному знімку Sentinel-2B L2A (ESA), композит True color, 21.09.2025 р.; б – 20.09.2025 р. (фото Ладики М.М.); в) 27.07.2024 р. (фото Ладики М.М.)

чень) води. Така його варіація залежить як від природних особливостей території (опадів, ерозійних процесів, ґрунтового покриття, чисельності біорізноманіття), так і антропогенних чинників.

Каламутність можна ефективно вивчати за допомогою оптичних дистанційних методів зондування Землі. Вони в свою чергу дозволяють аналізувати просторовий розподіл цього параметра і його часову варіацію у водних об'єктах.

Так, за результатами здійсненого обрахунку індексу NDTI встановлено, що його значення перебували в межах від 0 до -0,19...-0,33. Отримані від'ємні показники вказують на низьку каламутність води в зоні затоплення за вказаний період. Результати дистанційного зондування узгоджуються із нашими польовими і експериментальними даними. Індекс NDTI може бути ефективно використаний як індикатор просторово-часових змін каламутності води, зокрема для оперативного екологічного моніторингу водних об'єктів.

Застосування індексу SABI дозволяє виявляти зони поверхневого цвітіння води й оцінювати ступінь її евтрофікації, тобто здійснювати якісну характеристику цього процесу. Скупчення одноклітинних водоростей та ціанобактерій є важливим біологічним індикатором, який вказує на підвищену трофність. Їх кількість має причинно-наслідковий зв'язок із каламутністю води та застійним водним режимом.

Індекс SABI обраховано нами за період вегетації з 2022 по 2025 роки. Просторовий аналіз показав наявність локальних осередків із підвищеними значеннями (від 1,12 до 3,29) показника. Це часто зустрічається у мезо- та евтрофних водоймах у зонах, що межують із прибережною водною рослинністю та кущами.

Значення SABI мали чітко виражену сезонну динаміку. Зокрема, у ранньовесняний період (березень) його значення були в діапазоні від 0 до 0,2, що характеризувало відсутність «цвітіння» води. Натомість, в квітні місяці відбувалося збільшення показника до 0,28-0,35, що є ознакою поступового розвитку одноклітинних водоростей і ціанобактерій, які викликають евтрофікацію. У літньо-осінній періоді зафіксовано пікові значення SABI від 0,6 (у 2023 р.), 2,6 (у 2024 р.) та до 3,29 (у 2025 р.). Це засвідчує інтенсифікацію евтрофікаційного процесу. Однак, ці підвищені значення потребують подальшого уточнення із використанням інших індексів ідентифікації евтрофікації, що доповнюють SABI й розкривають інші аспекти цього процесу.

Для кількісної оцінки біомаси фітопланктону було визначено емпіричний вміст хлорофілу-а у воді (табл. 1). Просторовий статистичний аналіз отриманих даних проведено з використанням інструменту зональної статистики в середовищі QGIS. Він дозво-

**Описова статистика емпірично визначеного вмісту хлорофілу-а  
у воді затопленої долини р. Ірпінь (мкг/дм<sup>3</sup>)**

Дата	$\chi_{\text{сер}} \pm \sigma$	$\chi_{\text{min}}$	$\chi_{\text{max}}$	Дисперсія ( $\sigma^2$ )	Коефіцієнт варіації (V), %
2022-05-05	3,87 ± 1,59	-0,03	31,87	2,54	41,19
2022-08-25	4,65 ± 1,76	2,47	32,73	3,10	37,86
2023-03-21	4,48 ± 1,76	2,42	9,05	0,61	17,42
2023-08-15	3,87 ± 1,47	0,24	37,77	2,17	38,07
2023-09-27	5,61 ± 0,99	1,84	26,90	0,99	17,70
2024-04-09	4,13 ± 0,95	0,21	9,93	0,91	23,09
2024-06-28	3,97 ± 1,60	0,65	43,03	2,57	40,39
2024-08-27	6,15 ± 0,63	4,09	9,56	0,39	10,17
2024-09-21	5,66 ± 1,16	2,10	9,33	1,36	20,58
2025-03-20	4,68 ± 0,71	2,59	10,76	0,51	15,20
2025-04-25	4,75 ± 0,63	3,24	10,97	0,39	13,22
2025-08-30	6,21 ± 1,61	1,26	54,10	2,60	25,98
2025-09-23	6,75 ± 1,68	2,43	12,62	2,82	24,89

лив виявити просторові закономірності та гетерогенність у розподілі фітопланктону, які не є очевидними при розгляді вихідних даних.

Аналіз показав, що середні значення вмісту хлорофілу-а коливалися в межах 3,87-6,15 мкг/дм<sup>3</sup>. Спостерігалася чітка сезонна закономірність. Найвищі середні концентрації 5,61-6,75 мкг/дм<sup>3</sup>, як правило, реєструвалися в кінці літа та на початку осені (серпень-вересень). А мінімуми припадали на весну (березень-травень) – 3,87-4,75 мкг/дм<sup>3</sup>, що характерно для водних екосистем.

Спостерігався значний розкид між низькими середніми і максимальними даними, а саме: 31,87; 32,73; 37,77; 43,03; 54,10 мкг/дм<sup>3</sup>. Це є ознакою локальних точкових осередків «цвітіння» води.

Аналіз коефіцієнта варіації показав, що значення, в більшості випадків, перевищують 20% й можуть досягати 40%, що засвідчує просторову неоднорідність вмісту показника та наявність ділянок у водоймі з різними умовами (наприклад, глибиною, каламутністю, вмістом поживних речовин).

Високі значення дисперсії та коефіцієнта варіації вказують на те, що евтрофікація проявляється локально. Незначна відмінність між певними строками (наприклад, у 2025 р.) характеризує більш рівномірний розподіл фітопланктону й засвідчує стабілізацію біогеохімічних процесів у водоймі.

Обчислення індексу трофічного статусу (TSI) дало можливість простежити просторово-часову динаміку прояву евтрофікації по всій акваторії. На рис. 3 представлено результати аналізу стану акваторії у 2022 р. За даними першого строку спостережень (5.05.2022 р.), площа «чистої» водної поверхні, виділена за допомогою комплексної маски, становила 1419,33 га. Ця величина відрізняється від загальної оцінки площі затоплення ( $\approx 2500$  га), оскільки мето-

дологія виключає зони де вода була прихована кронами рослинності.

Слід відмітити, що в цей період індексу трофічного статусу мав широкий діапазон значень – від 12,4 (стан близький до оліготрофного) до 64,6 (евтрофний стан). Така значна амплітуда (понад 50 одиниць TSI) свідчить про значну просторову неоднорідність трофічного стану водойми. Цей висновок підтверджується статистичним просторовим аналізом вмісту хлорофілу-а.

До кінця літа 2022 р. (рис. 3б) площа водної поверхні скоротилася на 38% (до 879,83 га). Основною причиною цього було часткове відкачування води із затопленої території й бурхливе розростання водної та прибережно-водної рослинності (вегетація), яка зайняла частину колишньої акваторії.

Це скорочення площі та обсягу води, поєднане із потраплянням у водойму органічних речовин, спричинило посилення процесів евтрофікації, особливо в зонах з уповільненим водообміном. На карті просторового розподілу індексу трофічного статусу ці зони чітко візуалізуються як окремі (червоні) осередки підвищеної трофності.

Встановлено, що у пізньолітній період загальний стан водойми за TSI погіршився порівняно із весняним. Значення індексу коливалися в межах від 38,1 (стан, близький до мезотрофного) до 65,1 (евтрофний стан). Зміщення нижньої межі діапазону TSI (з 12,4 у травні до 38,1 у серпні) свідчить про те, що навіть найменш забруднені ділянки акваторії до кінця літа перейшли у стан підвищеної продуктивності, що підтверджує загальну тенденцію до поглиблення евтрофікації.

Подальший аналіз динаміки TSI у 2023 р. (рис. 4) виявив двофазну річну картину стану водойми: фаза відносної стабільності (весна-літо) та осінне

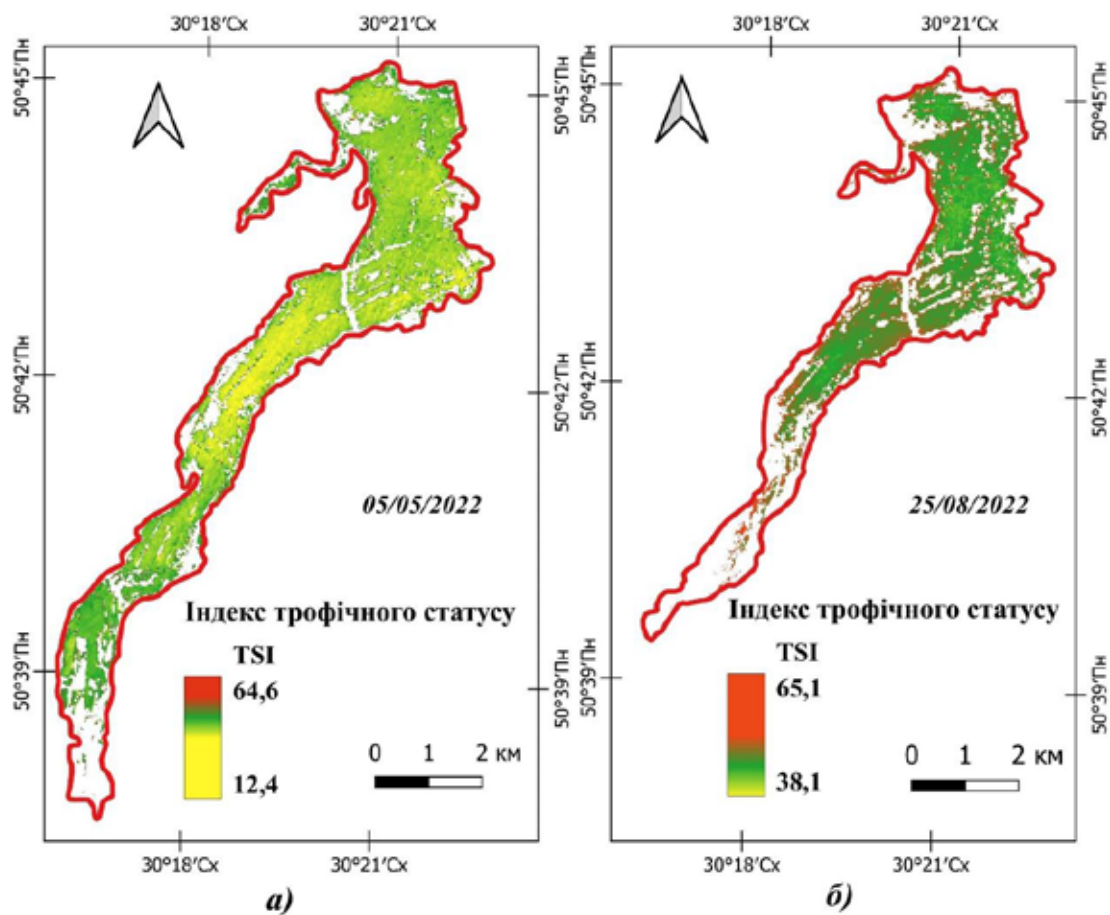


Рис. 3. Динаміка індексу трофічного статусу зони затоплення у долині р. Ірпін' у 2022 р. (а – 05.05.2022; б – 25.08.2022)

погіршення. Навесні та влітку акваторія перебувала у переважно мезотрофному стані з невеликим ухилом в напрямку евтрофії. Значення TSI в ці періоди коливалися незначно від 37-42 до 52-53, що засвідчує певну стабілізацію трофічного рівня, порівняно з різкими коливаннями попереднього року.

Восени 2023 р. зафіксовано чітке погіршення показників. Максимальне значення TSI зросло майже до 63, що вказує на перехід до евтрофного стану. Просторовий аналіз виявив локалізовані осередки підвищеної трофності.

У 2024 році (рис. 5) динаміка індексу трофічного статусу характеризувалася короткочасним, але критичним загостренням процесу евтрофікації, за яким послідувало відносно вирівнювання. В кінці червня спостерігався різкий стрибок значень TSI, які досягли максимуму 67,5. Таке явище відповідало близькому до гіпертрофного стану, що характеризується високим ризиком цвітіння ціанобактерій. Цвітіння локалізувалося в цей період, переважно, в районі дамби демидівського мосту. Цій ділянці притаманний застійний водний режим.

Цей критичний стан виявився тимчасовим. І вже до кінця літа та на початку осені значення індексу

повернулося до позначок від 44 до 52, що вказує на відновлення мезотрофного стану та набуття екосистемою відносної стабільності. Протягом всього періоду спостережень у цьому році, особливо на знімках після кризи (рис. 5в та 5г), чітко ідентифікуються стабільні зони з підвищеною трофністю, що свідчить про закріплення паттернів евтрофікації в акваторії.

Аналіз картографічних матеріалів 2025 року (рис. 6) засвідчує, що трофічний статус водної екосистеми затопленої долини Ірпеня стабілізувався на рівні, характерному для мезотрофних водойм. Базові значення індексу TSI переважно знаходяться в діапазоні від 41-43 до 54.

Однак, стабільність виявилася динамічною. У пізньолітній та ранньосінній періоди відмічено чітке сезонне посилення евтрофікації. Її сплеск припав на серпень 2025 р. Значення в цей період досягли 67, що відповідало стану посиленої евтрофії.

Просторова локалізація та масштаб явища стали ключовими характеристиками 2025 року. На рис. 6в і 6г чітко видно евтрофіковані ділянки (червоні локації). Кількісна оцінка показала, що частка акваторії, яка охоплена цим процесом зросла з 21%, (в серпні) до 34% (у вересні) від площі «чистої» водної

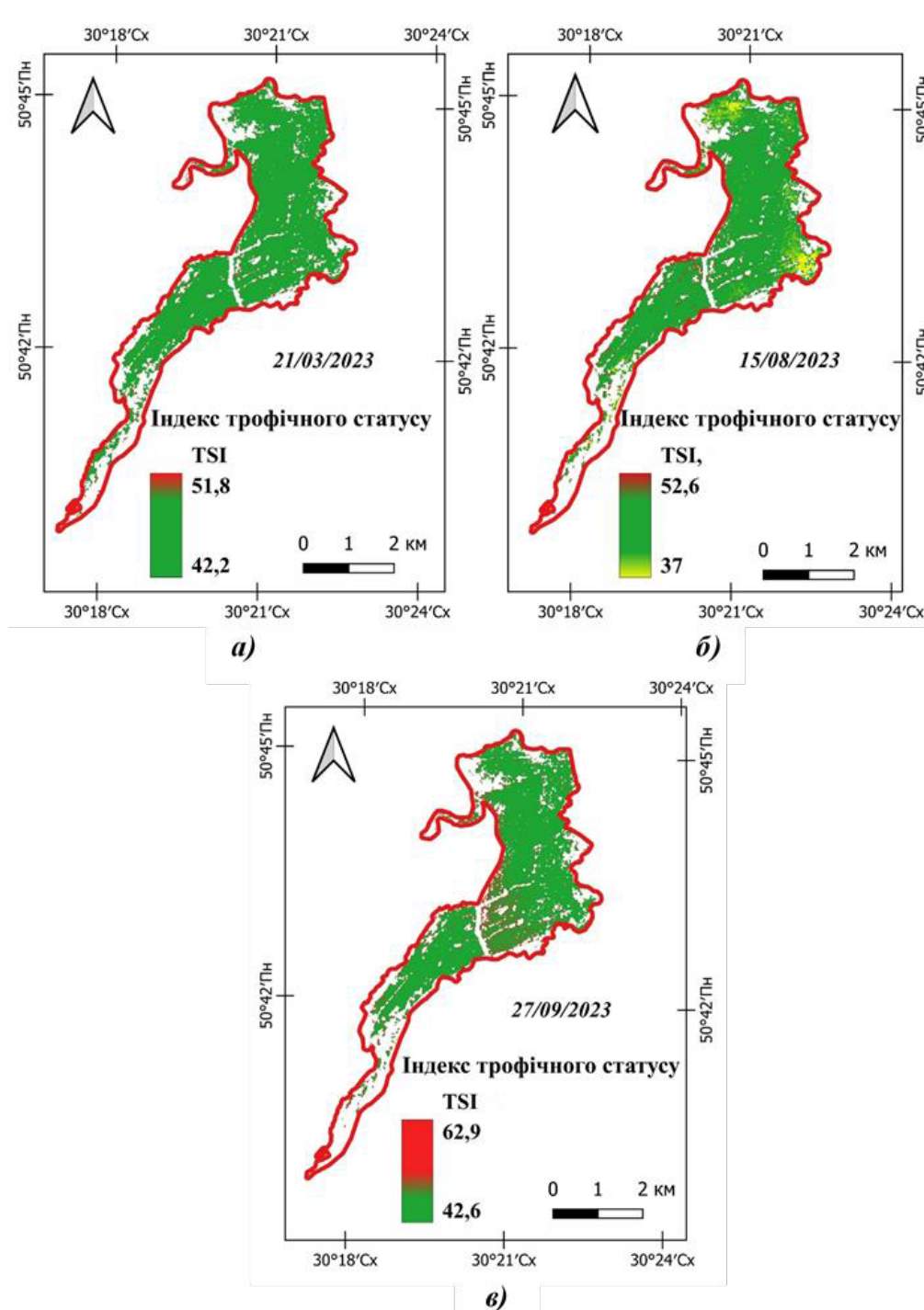


Рис. 4. Динаміка індексу трофічного статусу зони затоплення у долині р. Ірпінь у 2023 р. (а – 21.03.2023; б – 15.08.2023; в – 27.09.2023)

поверхні. Це свідчить не тільки про наявність «гарячих точок», але й про поширення зон «цвіління» у межах цієї водойми.

Аналіз методами ДЗЗ дав змогу не лише відстежити динаміку просторових змін, але й провести точну кількісну оцінку евтрофікаційних процесів в акваторії. На рис. 7 представлено часову динаміку площ водної поверхні, що відповідали різним кла-

сам трофічного статусу. Протягом усього періоду досліджень переважаним був мезотрофний тип водойми. Його частка коливалася від 66 до 99%, що в абсолютних величинах становило орієнтовно від 679 до 1024 га водної поверхні.

Результати аналізу свідчать про виражену сезонну динаміку з максимальною інтенсивністю процесів евтрофікації влітку та восени. Від 2024 р. спостері-

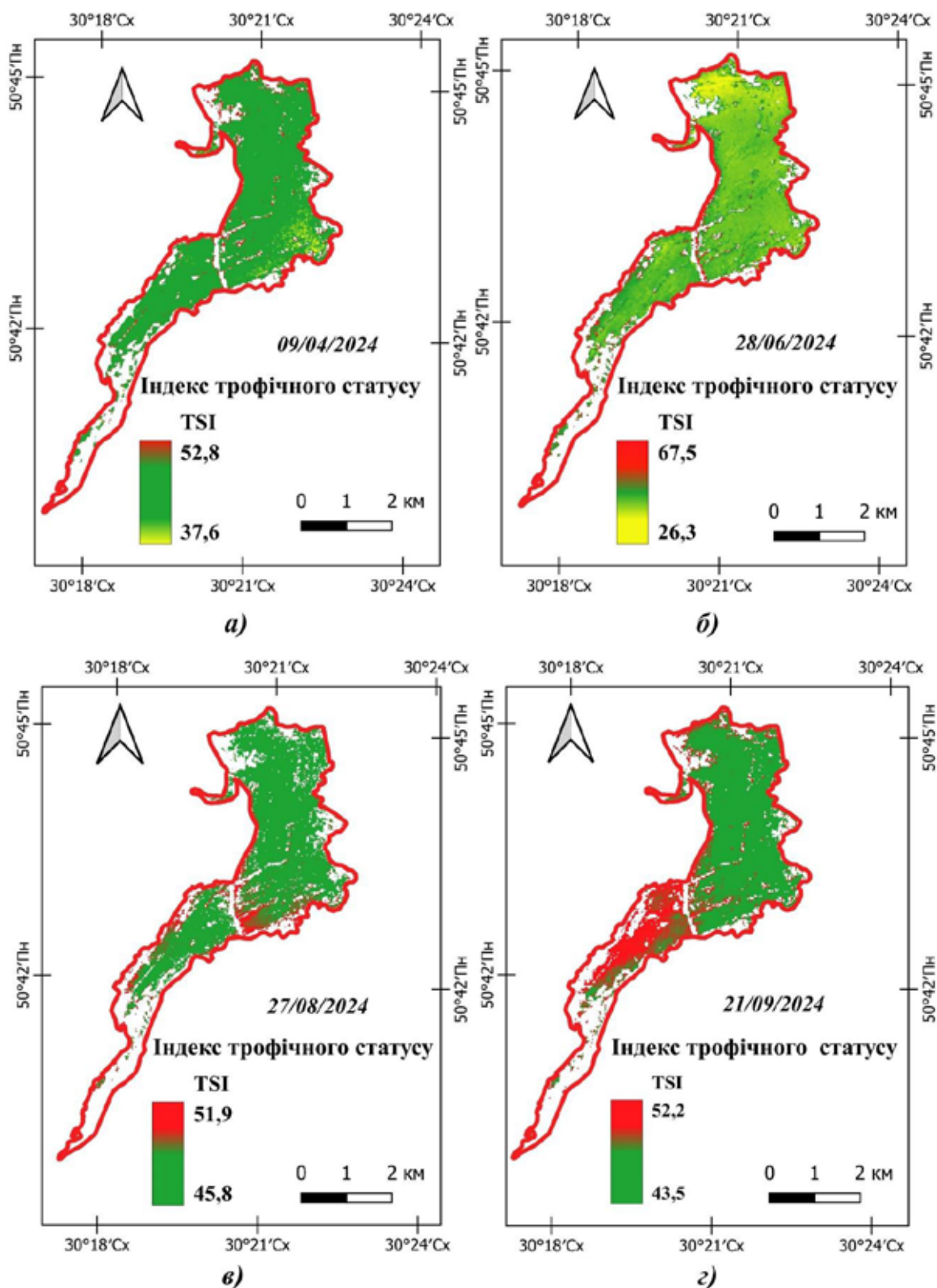


Рис. 5. Динаміка індексу трофічного статусу зони затоплення у долині р. Ірпінь у 2024 р. (а – 09.04.2024; б – 28.06.2024; в – 27.08.2024; з – 21.09.2024)

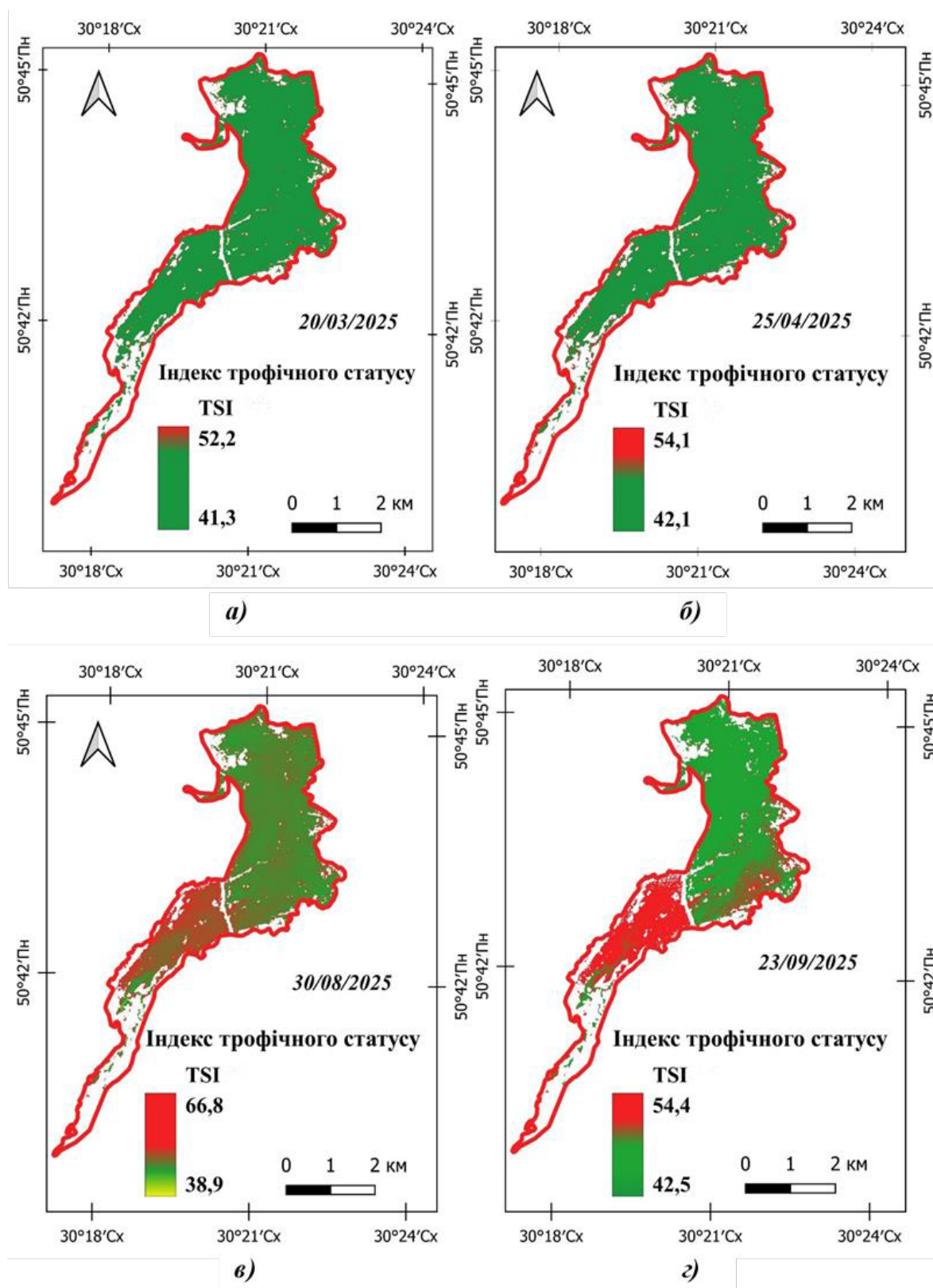


Рис. 6. Динаміка індексу трофічного статусу зони затоплення у долині р. Ірпінь у 2025 р. (а – 20.03.2025; б – 25.04.2025; в – 30.08.2025; з – 23.09.2025)

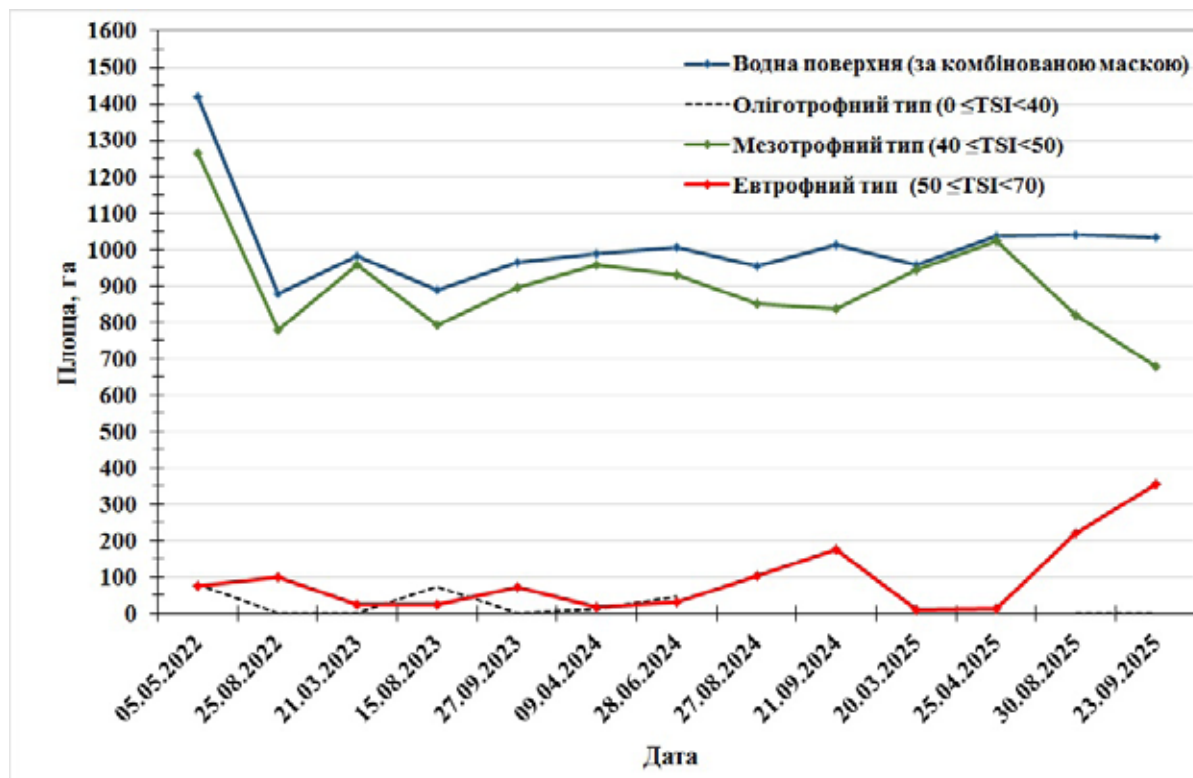


Рис. 7. Динаміка площ прояву евтрофікаційних процесів у затопленій долині р. Ірпінь у 2022-2025 рр.

гається чітка тенденція до еспансії площ, охоплених цими явищами: від 103,5 га (11%) влітку 2024 р. до 353,7 га (34%) восени 2025 р.

Таким чином, за останні два роки площа зон евтрофікації збільшилася майже втричі – з 11 до 34% від загальної водної поверхні, що свідчить про поглиблене навантаження на екосистему та відсутність ефективних механізмів її самоочищення.

**Головні висновки.** Методи ДЗЗ в комплексі з індексом TSI є ефективним інструментом для кіль-

кісної оцінки просторово-часової динаміки евтрофікаційних процесів у важкодоступних зонах. Метод дозволив виявити і точно визначити площі з різним трофічним статусом.

**Перспективи використання результатів дослідження.** Результати досліджень можуть бути використані для сталого управління водними ресурсами, розробки заходів цільової реабілітації водних екосистем, слугувати основою для оцінки ризиків деградації території.

### Література

- Писаренко П. В., Корчагін О. П. Екологічне обґрунтування регулювання процесів евтрофікації водних об'єктів. *Таврійський вісник*. 2020. Вип. 114. С. 274-283. DOI: 10.32851/2226-0099.2020.114.33.
- Kurovska A. Eutrophication of the Kyiv reservoir of Ukraine: Review. *Biological Systems: Theory and Innovation*. 2024. Vol. 15. № 1. P. 61-72. DOI: 10.31548/biologiya15(1).2024.005.
- Центило Л. В., Стецюк І. М. «Цвітіння» води ціанобактеріями як екологічна небезпека водойм. *Агроєкологічний журнал*. 2023. Вип. 3. С. 154-163. DOI: 10.33730/2077-4893.3.2023.288933.
- Vlasova O., Shevchenko A., Shevchenko I., Kozytzky O. Monitoring Of Water Bodies And Reclaimed Lands Affected By Warfare Using Satellite Data. *Land Reclamation and Water Management*. 2023. Vol. 2. P. 59-68. DOI: 10.31073/mivg202302-371.
- Стародубцев В., Ладика М., У Жофань, Паламарчук С., Наумовська О. Героїчна оборона та екологічна драма в долині річки Ірпінь. *Grail of Science*. 2023. Вип. 23. С. 172-182. DOI: 10.36074/grail-of-science.23.12.2022.28.
- Скрит С. І., Ладика М. М. Екологічні наслідки затоплення Долини річки Ірпінь. *Екологія – філософія існування людства* : зб. матеріалів доп. учасн. X Міжнар. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих учених, 24-25 квіт. 2024 р., Київ : НУБіП України, 2024. С. 267-269.
- Zhang Y., Li M., Dong J., Yang H., Van Zwieten L., Lu H., Alshameri A., Zhan Z., Chen X., Jiang X. et al. A Critical Review of Methods for Analyzing Freshwater Eutrophication. *Water*. 2021. Vol. 13. Issue 25. DOI: 10.3390/w13020225.
- Yang H., Kong J., Hu H., Du Y., Gao M., Chen F. A Review of Remote Sensing for Water Quality Retrieval: Progress and Challenges. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. Issue 8. DOI: 10.3390/rs14081770.
- Ладика М. М., У Жофань. Екосистемні функції і послуги водно-болотних угідь затопленої долини річки Ірпінь. *Екологія – виклики сучасності* : зб. матеріалів доп. V Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів і молодих вчених, 24-25 вересня 2025 р. Київ : НУБіП України, 2025. С. 57-59.

10. Про схвалення Водної стратегії України на період до 2050 року. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 9 грудня 2022 р. № 1134-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1134-2022-%D1%80#n8> (дата звернення: 23.01.2026).
11. Dube T., Shekede MD., Massari C. Remote Sensing for Water Resources and Environmental Management. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. Issue 1. DOI: 10.3390/rs15010018.
12. Schultz G. A., Engman E. T. (Eds.). Remote sensing in hydrology and water management. *Springer Science Business Media. Springer Science Business Media*. 2012. 480 p. URL: <https://surl.li/nlkkhl> (дата звернення: 15.01.2026).
13. Панасюк А. О. Явище “цвітіння” води (аналіз наукових праць закордонних учених). *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2025. Вип. 2 (76). С. 34–39. DOI: 10.17721/2306-5680.2025.2.3.
14. Фесюк В. О., Нетробчук І. М., Полянський С. В., Довган Д. Я. Особливості сучасного стану евтрофікації Шацьких озер. *Український журнал природничих наук*. 2024. Вип. 8. С. 279–288. DOI: 10.32782/naturaljournal.8.2024.29.
15. Romashchenko M., Yatsyuk M., Shevchenko A., Shevchuk S., Kozytsky O., Bozhenko R., Lyutnitsky S., Zabuga, A. Problems and prospects of the reclaimed floodplain of the Irpin River usage under the modern socio-economic and climatic transformations. *Land Reclamation and Water Management*, 2020. Vol. 1. P. 144–157. DOI: 10.31073/mivg202001-236.
16. Берія В. Д., Гандзюра В. П. Зміни еколого-популяційних особливостей угруповань літорального зоопланктону водних екосистем річки Ірпін та її приток у весняно-літній період 2024 року. *Екологічні науки*. 2024. Вип. 4 (55). С. 49–52. DOI: 10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.8.
17. Shevchenko T. F., Klochenko P. D., Sereda T. M. Phytoplankton annual dynamics and ecological characteristics in the Irpin River (Ukraine) prior to the beginning of military activities. *Hydrobiological Journal*. 2024. Volume 60, Issue 3. P. 26–44. DOI: 10.1615/HydrobJ.v60.i3.20.
18. Shevchenko T. F., Sereda T. M., Nezbyrta I. M., Bilous O. P., Afanasyev S. O. Changes in phytoplankton of the Irpin River (Ukraine) as a result of military activities in its basin. *Hydrobiological Journal*. 2024. Vol. 60. Issue 4. P. 24–37. DOI: 10.1615/HydrobJ.v60.i4.20.
19. Nezbyrta I., Bilous O., Sereda T., Ivanova N., Pohorielova M., Shevchenko T., Dubniak S., Lietytska O., Zhezherya V., Polishchuk O. et al. Effects of War-Related Human Activities on Microalgae and Macrophytes in Freshwater Ecosystems: A Case Study of the Irpin River Basin, Ukraine. *Water*. 2024. Vol. 16. Issue 24. DOI: 10.3390/w16243604.
20. Ладика М., У Жофань. Якість води в р. Ірпін в постмілітарний період. *Проблеми хімії та сталого розвитку*. 2025. Вип. 3. С. 69–80. DOI: 10.32782/pcsd-2025-3-8.
21. Zhezherya T. P., Zhezherya V. A., Linnik P. M., Osipenko V. P. Hydrochemical Characteristics of Small Rivers and Water Bodies within the Urbanized Territory. *Hydrobiological Journal*. 2025. Vol. 61. Issue 1. P. 86–106. DOI: 10.1615/HydrobJ.v61.i1.80.
22. Gholizadeh M. H., Melesse A. M., Reddi, L. A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques. *Sensors*. 2016. Vol. 16. Issue 8. DOI: 10.3390/s16081298.
23. Mishra S., Mishra D. R. Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 117. P. 394–406. DOI: 10.1016/j.rse.2011.10.016
24. Guansan D., Avtar R., Meraj G., Alsulamy S., Joshi D., Gupta L.N., Pramanik M., Kumar P. Integrating Remote Sensing and Machine Learning for Dynamic Monitoring of Eutrophication in River Systems: A Case Study of Barato River, Japan. *Water*. 2025. Vol. 17. Issue 89. DOI: 10.3390/w17010089.
25. Pan W., Yu F., Li J., Li C., Ye M. Quantification of chlorophyll-a in inland waters by remote sensing algorithm based on modified equivalent spectra of Sentinel-2. *Ecological Informatics*. 2025. Vol. 87. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2025.103061.
26. Shahvaran A. R., Kheyrollah Pour H., Van Cappellen P. Comparative Evaluation of Semi-Empirical Approaches to Retrieve Satellite-Derived Chlorophyll-a Concentrations from Nearshore and Offshore Waters of a Large Lake (Lake Ontario). *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16. DOI: 10.3390/rs16091595.
27. Ahn J., Kim K., Kim Y., Kim H., Lee Y. Detection of Floating Algae Blooms on Water Bodies Using PlanetScope Images and Shifted Windows Transformer Model. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16, 3791. DOI: 10.3390/rs16203791.
28. Mishra V. K., Maurya H., Nicolls F., Mishra A. K. Application of Multispectral Imagery and Synthetic Aperture Radar Sensors for Monitoring Algal Blooms: A Review. *Phycology*. 2025. Vol. 5. 71. DOI: 10.3390/phycolgy5040071.
29. Plichko L., Zatserkovnyi V., Khilchevskiy V., Ilchenko A., Nikolaenko O. Using the Surface Algal Bloom Index to assess the ecological state of a small river in an urbanized area and the possibility of its revitalization. *Geoinformatics*. 2021. Volume 2021. P.1-6. DOI: 10.3997/2214-4609.20215521124.
30. Fedonenko E. V., Kunakh O. M., Chubchenko Y. A., Zhukov O. V. (2022). Application of remote sensing data for monitoring eutrophication of floodplain water bodies. *Biosystems Diversity*, 2022. Vol. 30. Issue 2. P. 179–190. DOI: 10.15421/012219.
31. Кияшко О., Лазоренко Н., Кінь Д. До питання розроблення геоінформаційного моніторингу водно-болотних угідь каскаду водосховищ Дніпра методами ДЗЗ. *Build-Master-Class-2024 : Intern. scient.–pract. conf. of young scientists, Kyiv, 05-07 november 2024, Kyiv national university of construction and architecture (KNUCA)*. Kyiv : KNUCA. 2024. С. 145–146. URL: <https://repository.knuba.edu.ua/handle/123456789/15275> (дата звернення: 16.01.2026).
32. Фесюк В. О., Полянський С. В., Копитюк Т. В. Методика та практична імплементація застосування даних ДЗЗ для моніторингу евтрофікації водойм (на прикладі Турського озера). *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія «Географія»*. Тернопіль. 2022. Вип. 52. DOI: 10.25128/2519-4577.22.1.20.
33. Федоровський О. Д., Хижняк А. В., Томченко О. В. Assessing aquatic environment quality of the urban water bodies by system analysis methods based on integrating remote sensing data. *Космічна наука і технологія*, 2021. Вип. 27(5). С. 011-018. DOI: 10.15407/knit2021.05.011.
34. Хільчевський В. К. Ірпін (річка). *Велика українська енциклопедія* : веб-сайт. URL: [https://vue.gov.ua/Ірпін\\_\(річка\)](https://vue.gov.ua/Ірпін_(річка)) (дата звернення: 26.01.2026).
35. 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. Issue 14. P. 3025–3033. DOI: 10.1080/01431160600589179.

36. Normalized difference vegetation index. *Sentinelhub* : веб-сайт. URL: <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/sentinel-2/ndvi/> (дата звернення: 26.01.2026).
37. River Turbidity Estimation using Sentinel-2 data. *ESRI Developer* : веб-сайт. URL: <https://developers.arcgis.com/python-2-3/samples/river-turbidity-estimation-using-sentinel2-data/> (дата звернення: 26.01.2026).
38. Alawadi F. Detection of surface algal blooms using the newly developed algorithm surface algal bloom index (SABI). In *Remote sensing of the ocean, sea ice, and large water regions*. 2010. Vol. 7825. P. 45–58. DOI: 10.1117/12.862096.
39. Lai Y., Zhang J., Song Y., Gong Z. Retrieval and evaluation of chlorophyll-a concentration in reservoirs with main water supply function in Beijing, China, based on landsat satellite images. *International journal of environmental research and public health*, 2021. Vol. 18. Issue 9. DOI: 10.3390/ijerph18094419.
40. Carlson R. E. A trophic state index for lakes. *Limnology and oceanography*. 1977. Vol. 22. Issue 2. P. 361–369. DOI: 10.4319/lo.1977.22.2.0361.

Дата першого надходження статті до видання: 30.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026

## ОЦІНКА СХИЛЬНОСТІ ТЕРИТОРІЇ У МЕЖАХ УКРАЇНСЬКИХ КАРПАТ ДО РОЗВИТКУ ЗСУВНИХ ПРОЦЕСІВ ЗА ДАНИМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ТА ПЛАТФОРМИ GOOGLE EARTH ENGINE

Рушчак В.О., Чепурний І.В.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
вул. Карпатська, 15, 76019, Івано-Франківськ  
[rushchakvolodymyrr@gmail.com](mailto:rushchakvolodymyrr@gmail.com)

У статті наведено результати оцінки схильності території Українських Карпат до розвитку зсувних процесів на основі інтеграції морфометричних, гідрологічних і біотичних чинників із використанням супутникових даних дистанційного зондування Землі та хмарної геоінформаційної платформи Google Earth Engine. Актуальність дослідження зумовлена зростанням частоти та інтенсивності зсувних процесів у гірських районах Карпат, що пов'язано як із природними умовами (круті схили, флішова будова, інтенсивні опади), так і з антропогенними впливами, насамперед трансформацією лісового покриву.

Особливу увагу у дослідженні приділено ролі лісового покриву як структурного чинника стабільності схилів. На відміну від традиційних підходів, де ліс враховується у вигляді бінарного показника «ліс/не ліс», у запропонованій моделі застосовано індекс NDVI та показник відстані до межі лісових масивів, що дає змогу врахувати крайові ефекти, фрагментацію лісу та їх вплив на зволоження й ерозійні процеси. Дослідження виконано для ділянки площею 25×25 км у східній частині Закарпатської області, в басейні річки Теребля, де зафіксовано 236 зсувів за даними галузевого каталогу. Для побудови моделі використано цифрову модель рельєфу ALOS AW3D30 та похідні морфометричні показники (ухил, експозиція, абсолютні висоти, морфометрична нерівність рельєфу), інформацію про лісовий покрив за даними ESA WorldCover, а також гідрологічні характеристики, отримані з використанням набору даних MERIT Hydro. Усі вхідні фактори приведені до єдиної шкали шляхом нормалізації та інтегровано в індексну модель зсувної сприйнятливості (Landslide Susceptibility Assessment, LSA) з подальшою класифікацією території на п'ять рівнів небезпеки – від дуже низького до дуже високого.

Отримані результати свідчать, що зони з найвищими значеннями індексу LSA приурочені до крутих схилів середніх абсолютних висот, ділянок активної ерозії та крайових зон лісових масивів. Перевірка результатів на незалежній тестовій вибірці показала, що переважна більшість зсувів локалізується у класах середньої, високої та дуже високої сприйнятливості, що підтверджує ефективність і практичну придатність запропонованого підходу для регіонального районування зсувонебезпечних територій Українських Карпат. *Ключові слова:* зсуви, оцінка сприйнятливості до зсувів, лісовий покрив, морфометричний аналіз, дистанційне зондування Землі, Google Earth Engine.

### Assessment of Landslide Susceptibility of the territory within of the Ukrainian Carpathians Using Remote Sensing Data and the Google Earth Engine Platform. Rushchak V., Chepurnyi I.

The article presents the results of assessing the susceptibility of the territory of the Ukrainian Carpathians to the development of landslide processes based on the integration of morphometric, hydrological and biotic factors using satellite data of remote sensing of the Earth and the cloud geoinformation platform Google Earth Engine. The relevance of the study is due to the increase in the frequency and intensity of landslide processes in the mountainous areas of the Carpathians, which is associated with both natural conditions (steep slopes, flysch structure, intense precipitation), and anthropogenic influences, primarily the transformation of forest cover. The study pays special attention to the role of forest cover as a structural factor of slope stability. Unlike traditional approaches, where forest is taken into account as a binary indicator “forest/non-forest”, the proposed model uses the NDVI index and the distance to the forest boundary indicator, which allows taking into account edge effects, forest fragmentation and their impact on moisture and erosion processes. The study was conducted for a 25×25 km area in the eastern part of the Transcarpathian region, in the Tereblya River basin, where 236 landslides were recorded according to the industry catalog. To build the model, the ALOS AW3D30 digital terrain model and derived morphometric indicators (slope, exposure, absolute heights, morphometric relief unevenness), information on forest cover according to ESA WorldCover data, as well as hydrological characteristics obtained using the MERIT Hydro dataset were used. All input factors were reduced to a single scale by normalization and integrated into an index model of landslide susceptibility (Landslide Susceptibility Assessment, LSA) with subsequent classification of the territory into five levels of hazard – from very low to very high. The results obtained indicate that the zones with the highest values of the LSA index are confined to steep slopes of medium absolute altitudes, areas of active erosion and marginal zones of forest massifs. Verification of the results on an independent test sample showed that the vast majority of landslides are localized in the classes of medium, high and very high susceptibility, which confirms the effectiveness and practical suitability of the proposed approach for regional zoning of landslide-prone areas of the Ukrainian Carpathians. *Key words:* landslides, landslide susceptibility assessment, forest cover, morphometric analysis, remote sensing, Google Earth Engine.



**Постановка проблеми.** Активізація зсувних процесів у межах Українських Карпат є стійкою тенденцією останніх десятиліть і становить серйозну загрозу для природних ландшафтів, населених пунктів та інфраструктури. Її формування зумовлене поєднанням складних природних умов (круті схили, флішова будова, інтенсивні опади, сезонне перезволоження) та антропогенного впливу, передусім змін лісового покриву внаслідок рубок, фрагментації й будівництва лінійних об'єктів.

Незважаючи на значну кількість досліджень, оцінка схильності територій до розвитку зсувів у вітчизняній практиці здебільшого базується на морфометричних показниках рельєфу або враховує лісовий покрив у спрощеному вигляді – як бінарний фактор. При цьому структурні та крайові ефекти лісів, зокрема вплив відстані до межі лісового масиву, фрагментації та сезонного стану рослинності, залишаються недостатньо дослідженими та рідко інтегруються в моделі зсувної сприйнятливості.

Водночас сучасні супутникові архіви та хмарні платформи геоінформаційного аналізу, зокрема Google Earth Engine, створюють передумови для побудови відтворюваних, масштабованих моделей оцінки зсувної схильності з урахуванням як морфометричних, так і біотичних чинників. Це зумовлює необхідність розроблення інтегрованого підходу до оцінки зсувної сприйнятливості територій Українських Карпат, у якому лісовий покрив розглядається як структурний фактор, а не лише як фоновий елемент ландшафту.

**Актуальність дослідження.** Зсувні процеси є одними з найбільш небезпечних екзогенних геологічних явищ у гірських районах і становлять суттєву загрозу для природних ландшафтів, населених пунктів та інфраструктури Українських Карпат. Їх активізація зумовлена поєднанням природних чинників (круті схили, складна геологічна будова, інтенсивні опади, сніготанення) та антропогенного впливу, насамперед лісогосподарської діяльності й розвитку транспортної інфраструктури. В умовах зростання кліматичних екстремумів зростає потреба в оперативних регіональних оцінках зсувної сприйнятливості.

Сучасні супутникові архіви та хмарні платформи геопросторової аналітики, зокрема Google Earth Engine, забезпечують можливість інтегрованого аналізу довгих часових рядів і факторів зсувоутворення на великих територіях [1]. Особливо актуальним є врахування динаміки лісового покриву як ключового стабілізуючого чинника схилів. Застосування цих підходів для Українських Карпат дозволить підвищити обґрунтованість оцінок зсувної небезпеки та науково підтримати прийняття управлінських рішень.

**Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.**

Велика кількість праць у цьому напрямку послідовно підкреслює важливість лісу як індикатора та чинника розвитку зсувних процесів у Карпатах. Зокрема, у роботі [2] показано придатність дис-

танційних методів для оцінювання втрат лісового покриву в Карпатському регіоні й запропоновано використання цифрових моделей рельєфу та похідних морфометричних показників для просторового аналізу ризиків [3]. Останніми роками з'являються роботи, де просторовий зв'язок між контурами/центроїдами зсувів і структурою лісового покриву підтверджується кількісно – за допомогою буферного аналізу, морфометричних градієнтів, метрик фрагментації та відстаней до межі лісу [4]. Ці результати логічно узгоджуються з міжнародною практикою дистанційного зондування для ландшафтної діагностики небезпек і слугують базою для інтегрованих індексів вразливості на основі рельєфу й покриву.

Разом із тим у вітчизняній літературі досі бракує систематизованих підходів до побудови карти схильності до зсувів (landslide susceptibility assessment, LSA), де чинник лісу враховується структурно – через відстань до межі лісу, ступінь фрагментації, сезонні індекси (наприклад, NDVI у період вегетаційного максимуму) та морфометричні взаємодії з ухилом і експозицією. Окремі спроби показують високу інформативність саме крайових зон, де контраст біотичних і гідрологічних властивостей максимальний: такі перехідні смуги часто корелюють із активними або потенційними зсувними схилами, полягає у розвитку та застосуванні сучасних підходів просторово-часового аналізу зсувної сприйнятливості гірських територій на основі супутникових даних і хмарних геоінформаційних платформ. Отримані результати спрямовані на розв'язання актуальних наукових завдань із кількісної оцінки ролі природних і антропогенних чинників, зокрема динаміки лісового покриву, у формуванні зсувних процесів. У практичному вимірі напрацювання можуть бути використані для регіонального моніторингу зсувної небезпеки, підтримки планування лісогосподарських та інфраструктурних заходів, а також для підвищення обґрунтованості управлінських рішень у системі зменшення ризиків природних небезпек.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Оцінка схильності території до зсувів (landslide susceptibility assessment, LSA) на основі геопросторових даних є одним із найдинамічніших напрямів у сучасній геоінформатиці. Вона поєднує морфометричний аналіз цифрових моделей рельєфу, оцінку стану земельного покриву, гідрологічні та кліматичні фактори, а також статистичне або машинне моделювання просторової вразливості. У світовій практиці сформовано два ключові підходи – евристичний (індексний) і статистичний (моделний), які поступово зближуються завдяки інтеграції даних дистанційного зондування та платформ на кшталт Google Earth Engine (GEE) [1].

Серед робіт, які задали методичні стандарти для побудови карт схильності до зсувів, варто відзначити дослідження [5], де застосовано індексний підхід з ваговими коефіцієнтами факторів (ухил, експози-

ція, літологія, відстань до тектонічних розломів та доріг). Праці [6-7] довели ефективність статистичних моделей логістичної регресії, а також методів частотного співвідношення та індексу достовірності для визначення просторових закономірностей між розташуванням зсувів і наборами предикторів.

Після 2010-х років у зв'язку з масовою доступністю даних DEM (SRTM, ASTER, Copernicus GLO-30) і оптичних супутникових серій (Landsat, Sentinel) інтерес дослідників змістився в бік автоматизованих моделей схильності. Наприклад, у [8] використано машинне навчання для оцінки сприйнятливості до зсувів території у районі Вунін, Китай, де розглянуто 14 факторів, серед яких NDVI, який мав одну з найвищих інформаційних ваг. У роботі [9] на основі польових спостережень, морфометричного аналізу та ГІС-даних автори показали, що масове порушення лісового покриву різко знижує стабільність схилів, підсилює поверхневий стік і ерозійні процеси, що призводить до зростання частоти зсувів і руслових деформацій. Доведено, твердження про ключову стабілізаційну роль лісів у гірських екосистемах, що має важливе значення для оцінювання зсувної небезпеки та планування відновлення лісів у зонах природних і антропогенних порушень. У роботі [10] запропоновано модель сприйнятливості до зсувів, що базується на багатокритеріальній просторовій оцінці з урахуванням кліматичних і морфометричних чинників та використанні транснаціональних інвентарів зсувів, що забезпечує можливість регіонального порівняльного аналізу. Дослідження [11] демонструє ефективність поєднання даних дистанційного зондування і ГІС із методом частотного співвідношення для детального картографування зсувної небезпеки в умовах складного гірського рельєфу та інтенсивного антропогенного впливу. Робота [12] систематизує статистичні та машинно-навчальні підходи до оцінювання зсувної сприйнятливості й підкреслює зростаючу роль супутникових даних у підвищенні достовірності прогнозування зсувних процесів у гірських регіонах.

Поява платформи Google Earth Engine (GEE) сприяла переходу від локальних моделей до масштабованих регіональних оцінок. GEE забезпечує уніфікований доступ до супутникових архівів, DEM, кліматичних та ґрунтових шарів, дозволяючи реалізувати повний цикл LSA – від збору даних до побудови індексу чи навчання моделі [1].

Так, у праці [13] застосували GEE для розрахунку індексу сприйнятливості до зсувів у горах Сичуаню, поєднуючи NDVI, ухил, опади та щільність дренажної мережі. Подібний підхід було реалізовано у [14].

В українському науковому просторі протягом останнього десятиліття активно розвиваються підходи до оцінювання стану лісового покриву та зсувної небезпеки в Карпатах. Зокрема, використано відкриті супутникові джерела для картографування втрат лісу та визначення тенденцій деградації лісових екосистем [4]. Дослідження [15] вперше про-

демонструвало кількісний зв'язок між розташуванням зсувів і межами лісових масивів у межах Українських Карпат. Автори показали, що понад 70 % зсувів припадають на зону до 500 м від межі лісу, що підтверджує роль крайових ефектів як тригерів. У роботі [16] за допомогою платформи GEE проаналізовано взаємний просторовий розподіл лісів та зсувних ділянок у межах східної частини Закарпаття та Івано-Франківщини. У роботі [17] використовується GEE для інтеграції супутникових та екологічних даних для регіонального картографування сприйнятливості зсувів на Карпатах.

**Невирішені питання та мета даного дослідження.** Більшість наявних робіт при районуванні території щодо схильності до зсувів або обмежуються суто морфометричними факторами (ухил, експозиція, кривизна), або розглядають лісовий покрив тільки у контексті його наявності чи відсутності. Водночас порогові та крайові ефекти лісів майже не вивчалися, наприклад, вплив відстані до межі лісу. Тому метою даного дослідження є удосконалення підходу до оцінки схильності територій до виникнення зсувів (LSA), який уніфіковано поєднує NDVI підходи до оцінки динаміки лісового покриву та врахування відстаней до межі лісу, морфометричні та структурні змінні, придатні до розрахунку на платформі GEE для гірських ландшафтів Українських Карпат.

**Новизна.** Наукова новизна дослідження полягає в залученні платформи Google Earth Engine (GEE) для розрахунку оцінки схильності територій до виникнення зсувів, зокрема, поєднанні класичного підходу щодо визначення лісового покриву за NDVI, врахуванні структурного параметра відстані до межі лісового масиву, морфометричних факторів (ухил, експозиція, абсолютні відмітки рельєфу, морфометрична нерівність рельєфу, відстань до базису ерозії (водотоків) і та одержанні показника схильності територій до виникнення зсувів (LSA) з подальшою його класифікацією. Використання GEE для аналізу сателітних даних забезпечує придатність до масштабування для інших зсувонебезпечних територій Карпат.

**Методологічне або загальнонаукове значення.** Методологічною основою дослідження є принцип інтегральної оцінки схильності територій до розвитку зсувних процесів (Landslide Susceptibility Assessment, LSA) на базі багатofакторного геоінформаційного аналізу. У межах даної роботи реалізовано адаптивну індексну модель, що поєднує морфометричні, структурні та біотичні параметри, розраховані за допомогою супутникових даних Sentinel-2, цифрової моделі рельєфу ALOS World 3D (AW3D30) та алгоритмів Google Earth Engine (GEE) [1].

Основною концепцією є врахування взаємодії трьох блоків чинників, які визначають схильність схилів до зсувів, а саме морфометричного блоку, який включає чинники ухил (Slope), експозиція (Aspect), абсолютні відмітки рельєфу (Elevation), морфометрична нерівність рельєфу (Roughness),

відстань до базису ерозії (водотоків), розрахована на основі цифрової моделі рельєфу з використанням гідрологічного аналізу. Біотичний блок визначає стан та структуру лісового покриву, які оцінені за індексом NDVI та відстанню до межі лісу. Структурний блок це інтегральний проксі-індекс, який поєднує морфометричні та біотичні показники у безрозмірному діапазоні (0–1) для отримання карти відносної вразливості (LSA index).

Методологічні етапи моделювання передбачають формування первинних шарів, побудову похідних кількісних факторних характеристик, розрахунок індексу LSA та його класифікація на 5 рівнів вразливості території до розвитку зсувних процесів.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження проведено для ділянки розміром 25×25 м, яка розташована у східній частині Закарпатської області, включає у свої межі такі населені пункти, як Колочава, Руська Мокра, Лопухів, Усть Чорна (рис. 1).

У її межах згідно каталогу зсувів ДНВП «Геоінформ України» зареєстровано 236 зсувів. Територія досліджень розташована у верхів'ях басейну річки Теремля, між хребтами Красна та Пішконя. Територія характеризується типовими для Карпат стрімкими схилами (ухили 20–40°), складеною флішовою товщею (чергування пісковиків, алевролітів, аргілітів) і високим рівнем зволоження. Середні абсолютні відмітки території становлять близько 650 м н.р.м., мак-

симальні значення сягають 1300 м над рівнем моря. (г. Дарвайка, г. Менчул). Лісовий покрив переважає – близько 70 % площі – і представлений буковими, ялицевими та смерековими формаціями. Середній річний обсяг опадів перевищує 1200 мм, що створює передумови для інфільтрації вод у ґрунти та схилі породи, що у поєднанні з антропогенними факторами (лісозаготівлі, прокладання доріг) може спричинити активізацію зсувів.

Для побудови карти схильності території дослідження до розвитку зсувів (Landslide Susceptibility Assessment, LSA) було використано комплекс просторових даних дистанційного зондування Землі та похідних геоморфометричних показників, інтегрованих у хмарному геоінформаційному середовищі Google Earth Engine.

Базовим набором вихідних даних слугувала цифрова модель рельєфу ALOS AW3D30 (JAXA) з просторовою роздільною здатністю близько 25–30 м, яка була приведена до єдиної проєкції та обрізана за межами досліджуваної території. На основі ЦМР було розраховано ключові морфометричні параметри рельєфу, що безпосередньо впливають на формування та активізацію зсувних процесів. Крутизна схилів (Slope), обчислена у градусах, використана як один із головних факторів гравітаційної нестійкості схилів. Для врахування нелінійного характеру впливу крутості на розвиток зсувів застосовано гау-



Рис. 1. Територія досліджень з нанесеними зсувними ділянками

сівську функцію ризику з максимумом у зоні середніх і крутих схилів. Експозиція схилів (Aspect) була нормалізована у діапазоні 0–1 та використана як допоміжний фактор, що опосередковано відображає відмінності у зволоженні, інсоляції та мікрокліматичних умовах схилів. Морфометрична нерівність рельєфу (Roughness) визначалась як стандартне відхилення висот у локальному вікні 7×7 пікселів, що дозволило ідентифікувати ділянки з порушеною морфологічною структурою поверхні, характерною для активних або реліктових зсувних форм. Для врахування ролі рослинного покриву було використано дані ESA WorldCover, на основі яких сформовано маску лісів та обчислено відстань до межі лісового покриву. Отриманий показник трансформовано у фактор ризику, що відображає зростання зсувонебезпечності поблизу лісових узлісь. Гідрологічний чинник враховано шляхом аналізу даних MERIT Hydro, зокрема показника накопичення стоку (upstream pixels), на основі якого було ідентифіковано дрібні водотоки та мікроканали. Для них обчислено відстань до водотоків, яка експоненційно трансформувалася у фактор зсувного ризику, що відображає вплив ерозійних і водонасичувальних процесів. Додатково враховано абсолютну висоту місцевості, нормалізовану у межах досліджуваної території, як узагальнений показник морфоструктурних і кліматичних відмінностей.

Усі фактори було приведено до єдиної шкали 0–1 за допомогою робастної нормалізації та інтегровано у зважену сумарну LSA-проксі-модель, після чого результуючий індекс класифіковано на п'ять класів зсувонебезпечності (LSA 1–5) – від дуже низького до дуже високого рівня ризику.

На основі шару лісового покриву було розраховано показник відстані до лісу, представлений у вигляді знакової евклідової відстані, що дозволяє врахувати роль лісової рослинності у формуванні схилових процесів. Для валідаційного аналізу та просторової інтерпретації результатів було використано векторний шар існуючих зсувів, що містить точкові об'єкти фактично зафіксованих зсувних тіл. Даний шар застосовувався для визначення меж досліджуваної області, а також для подальшого якісного порівняння розподілу зсувів із зонами підвищеної схильності. Усі вхідні растрові показники були приведені до єдиної роздільної здатності, нормалізовані до інтервалу 0–1 та інтегровані у індекс зсувної схильності, який згодом було перекласифіковано на п'ять класів (Дуже низька – Дуже висока) для формування карти схильності території дослідження до розвитку зсувів (LSA).

Для врахування впливу лісового покриву лісу, який, як показано у дослідженнях [15], відіграє значну роль у активізації розвитку зсувних процесів, застосовано фактор відстань до межі лісу. Його сутність полягає у визначенні відстані кожного пікселя до найближчої межі між лісовими та відкритими

ділянками з урахуванням знаку: негативні значення – для пікселів, що розташовані всередині лісу, позитивні додатні для пікселів поза лісом, нульові значення – власне межа лісу. Таким чином отримано растровий шар, який враховує межі лісу, який є чутливим до форми лісових масивів і опосередковано визначає вплив межі лісу, яка потенційно впливає на ризик розвитку зсувів через вплив локальної зміни гідрологічного режиму схилу.

Отриманий результат інтерпретується як безрозмірна карта вразливості, де 0.0–0.2 – дуже низька схильність, 0.2–0.4 – низька, 0.4–0.6 – середня, 0.6–0.8 – висока, 0.8–1.0 – дуже висока. Для кількісної оцінки точності отриманого індексу LSA використано векторну базу точок зсувів, з яких 70 % зсувних ділянок є навчальною, 30 % точок – тестова база, що застосовується для оцінювання ефективності моделі. Таке співвідношення (70:30) є загальноприйнятим у дослідженнях схильності до зсувів [18, 19].

На рисунку 2 наведено картограму індексу схильності до зсувів (LSA), яка відображає диференціацію території досліджень за рівнем потенційної схильності до розвитку зсувних процесів (рис. 5).

Індекс набуває значень у межах 0–1, де:

- 0–0.2 – стабільні ділянки (дуже низька схильність);
- 0.2–0.4 – відносно стабільні (низька);
- 0.4–0.6 – помірна;
- 0.6–0.8 – висока;
- 0.8–1.0 – дуже висока схильність.

Найвищі значення LSA (>0.8) фіксуються на крутих схилах південної та південно-західної експозиції, переважно у межах висот 600–900 м н.р.м., що відповідає активним терасовим схилам.

Геоінформаційний аналіз щодо оцінки розподілу площі території досліджень за класами LSA дає такі результати: клас 1 (дуже низька схильність) – 76,31 км<sup>2</sup> (10,8%); клас 2 (низька схильність) – 161,76 км<sup>2</sup> (22,9%); клас 3 (помірна) – 217,95 км<sup>2</sup> (30,9%); клас 4 (висока схильність) – 165,23 км<sup>2</sup> (23,4%); клас 5 (дуже висока схильність) – 84,25 км<sup>2</sup> (11,9%).

З метою валідації моделі проведено просторовий аналіз щодо оцінки класу сприйнятливості щодо розвитку зсувів для зсувних ділянок вибірки тестових зсувів. На рисунку 3 наведено гістограму розподілу для тестових зсувів за класами сприйнятливості території до зсувів. Як видно з рис. 3 в клас дуже низької сприйнятливості попадає 2 зсуви, низької – 15, середньої – 21, високої – 23, дуже високої – 19.

Абсолютна більшість зсувів попадає в класи сприйнятливості території щодо розвитку зсувів від середнього до дуже високого, що дає змогу попередньо стверджувати про достовірність моделі.

**Головні висновки.** У роботі реалізовано інтегрований підхід до оцінки схильності територій Українських Карпат до розвитку зсувних процесів на основі поєднання морфометричних, гідрологіч-

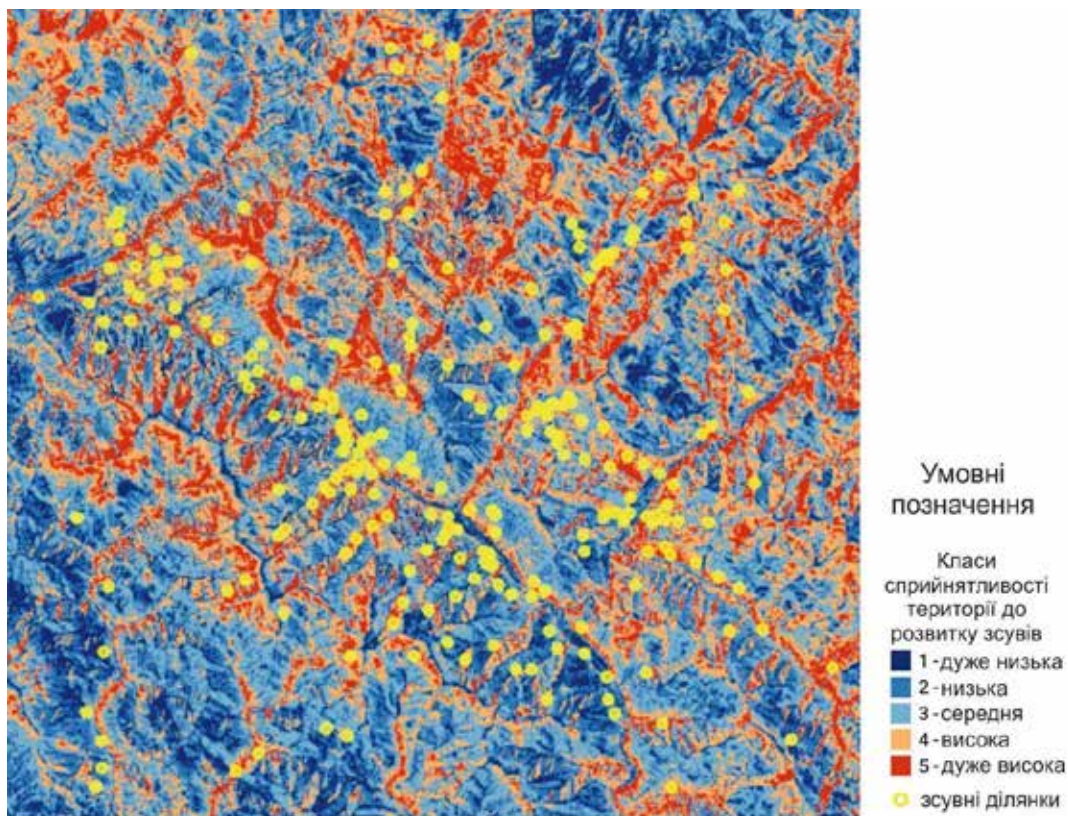


Рис. 2. Картограма схильності території до розвитку зсувів (LSA) з нанесеними зсувними ділянками

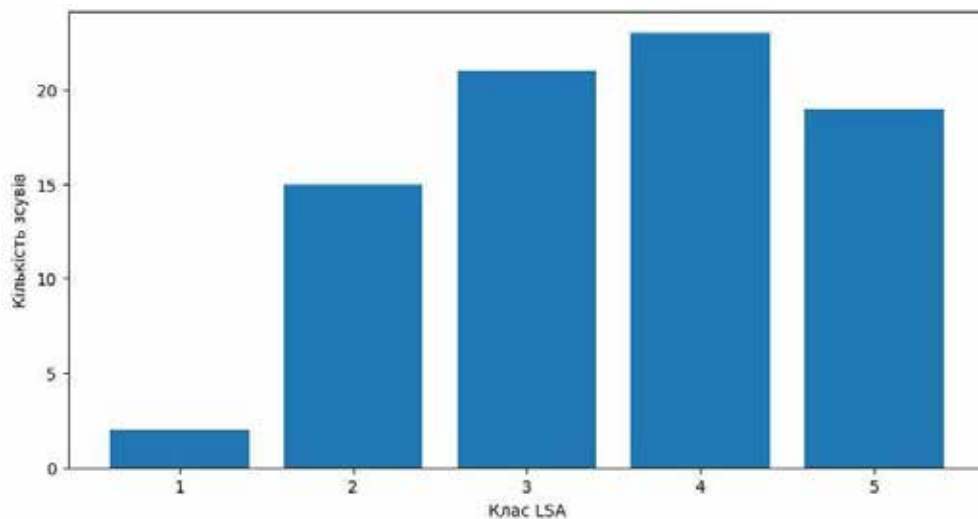


Рис. 3. Гістограма розподілу тестових зсувів за класами сприйнятливості території до зсувів

них і біотичних чинників із використанням супутникових даних та платформи Google Earth Engine. Запропонована індексна модель базується на уніфікованій нормалізації факторів і дозволяє отримати безрозмірну карту відносної зсувної сприйнятливості в діапазоні 0–1. Показано, що врахування лісового покриву як структурного чинника, зокрема через відстань до межі лісу та індекси стану рослинності, істотно підвищує інформативність моделі порівняно

з традиційними підходами, де ліс розглядається лише як бінарний параметр. Найвищі значення індексу LSA приурочені до крутих схилів середніх висот, зон активної ерозії та крайових ділянок лісових масивів, що узгоджується з фактичним просторовим розподілом зсувів. Результати валідаційного аналізу з використанням незалежної тестової вибірки зсувів засвідчили, що абсолютна більшість зсувних ділянок локалізується у класах середньої, високої та дуже

високої схильності, що підтверджує адекватність і практичну придатність запропонованої моделі. Отримана карта LSA може розглядатися як інструмент регіонального рівня для попереднього районування територій за ступенем зсувної небезпеки.

**Перспективи використання результатів дослідження.** Отримані результати можуть бути використані для регіонального моніторингу та просторового планування в межах зсувонебезпечних територій Українських Карпат, зокрема при розміщенні інфраструктурних об'єктів, плануванні лісогосподарських заходів і оцінюванні наслідків змін землекористування. Запропонований підхід є відтво-

рюваним і масштабованим, що дозволяє застосовувати його для інших гірських регіонів за наявності стандартних супутникових даних.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на інтеграцію часової складової (аналіз динаміки NDVI, опадів та вологості ґрунтів), використання актуальних даних щодо зсувної активності зсувів для статистичного навчання моделей, а також порівняння індексного підходу з методами машинного навчання. Також використання можливостей обробки даних дистанційного зондування Землі для удосконалення існуючих методик просторово-часового регіонального прогнозування зсувів.

### Література

1. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone / Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. *Remote Sensing of Environment*. 2017. Vol. 202. P. 18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
2. Chaskovskyy O. H., Hrynyk H. H. Estimation of losses of forest cover of the Ukrainian Carpathians by remote methods based on the materials of open sources of satellite information. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2020. Vol. 30, № 1. P. 66–73. DOI: 10.36930/40300111.
3. Implementation of the LandTrendr algorithm on Google Earth Engine / Kennedy R. E., Yang Z., Gorelick N., Braaten J., Cavalcante L., Cohen W. B., Healey S. *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10, № 5. Article 691. DOI: 10.3390/rs10050691.
4. Chepurnyi I., Rushchak V. Analysis of forest cover parameters and their relationship with landslides in the Ukrainian Carpathians using GEE. *Proceedings of Monitoring'2023*. Kyiv, 2023. P. 1–6.
5. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy / Guzzetti F., Carrara A., Cardinali M., Reichenbach P. *Geomorphology*. 1999. Vol. 31, № 1–4. P. 181–216. DOI: 10.1016/S0169-555X(99)00078-1.
6. Carrara A. GIS technology in mapping landslide hazard. *GIS in Assessing Natural Hazards* / eds. A. Carrara, F. Guzzetti. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1995. P. 135–175.
7. Ayalew L., Yamagishi H. The application of GIS-based logistic regression for landslide hazard mapping in Central Japan. *Geomorphology*. 2005. Vol. 65, № 1–2. P. 15–31. DOI: 10.1016/j.geomorph.2004.06.010.
8. Landslide susceptibility assessment at the Wuning area, China: a comparison between multi-criteria decision making, bivariate statistical and machine learning methods / Hong H., Shahabi H., Shirzadi A., Chen W., Chapi K., Ahmad B. B., Roodposhti M. S., Yari Hesar A., Tian Y., Tien Bui D. *Natural Hazards*. 2019. Vol. 96, № 1. P. 173–212. DOI: 10.1007/s11069-018-3536-0.
9. The intensity of slope and fluvial processes after a catastrophic windthrow event in small catchments in the Tatra Mountains / Strzyżowski D., Gorczyca E., Krzemień K., Żelazny M. *Journal of Mountain Science*. 2021. Vol. 18, № 6. P. 1405–1423. DOI: 10.1007/s11629-021-6726-2.
10. Climate-physiographically differentiated Pan-European landslide susceptibility assessment using spatial multi-criteria evaluation and transnational landslide information / Günther A., van Den Eeckhaut M., Malet J.-P., Reichenbach P., Hervás J. *Geomorphology*. 2014. Vol. 224. P. 69–85. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.07.011.
11. Sonker I., Tripathi J. N., Swarnim. Remote sensing and GIS-based landslide susceptibility mapping using frequency ratio method in Sikkim Himalaya. *Quaternary Science Advances*. 2022. Vol. 8. 100067. DOI: 10.1016/j.qsa.2022.100067.
12. Landslide susceptibility in mountainous regions of the Andes: a review and new insights / Reichenbach P., Rossi M., Malamud B. D., Mihir M., Guzzetti F. *Journal of Mountain Science*. 2022. Vol. 19, № 3. P. 543–567. DOI: 10.1007/s11629-021-7011-0.
13. Integration of predisposing and triggering factors in landslide susceptibility mapping using hybrid machine learning methods / An B., Zhang Z., Xiong S., Zhang W., Yi Y., Liu Z., Liu C. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16, № 22. 4218. DOI: 10.3390/rs16224218.
14. Landslide susceptibility mapping based on convolutional neural network and extreme learning machine / Wu W., Zhang Q., Singh V. P., Wang G., Zhao J., Shen Z., Sun S. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, № 18. Article 4662. DOI: 10.3390/rs14184662.
15. van Westen C. J., Castellanos E., Kuriakose S. L. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: an overview. *Engineering Geology*. 2008. Vol. 102, № 3–4. P. 112–131. DOI: 10.1016/j.enggeo.2008.03.010.
16. Reichenbach P., Rossi M., Malamud B. D., Mihir M., Guzzetti F. A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*. 2018. Vol. 180. P. 60–91. DOI: 10.1016/j.earscirev.2018.03.001.
17. Spatial Analysis of the Relationship between the Distribution of Landslide Areas and Forest Cover / Chepurnyi I., Rushchak V., Chepurna T. *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2024»*. 2024. Vol. 2024, issue 1. P. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.2024510017.
18. Assessment of Forest Cover Dynamics in Landslide-Prone Areas of the Ukrainian Carpathians using Remote Sensing Data / Rushchak V., Chepurnyi I. *18th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. 2025. Vol. 2025. P. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.2025510172.
19. Davybida L. Remote sensing and Google Earth Engine for Regional Landslide Assessment in the Carpathians. *5th EAGE Workshop on assessment of landslide hazards and impact on communities*. 2025. Vol. 2025. P. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.2025520018.

Дата першого надходження статті до видання: 29.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026

## СТРАТЕГІЧНІ НАПРЯМИ РОЗВИТКУ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИХ ХІМІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В КОНТЕКСТІ ГЕОЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ТА ЄВРОІНТЕГРАЦІЇ УКРАЇНИ

Саввова О.В., Телюра Н.О.

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова  
вул. Черноглазівська, 17, 61002, м. Харків  
Oksana.Savvova@kname.edu.ua, Natalya.Telyura@kname.edu.ua

Метою дослідження є комплексний системний аналіз актуальних питань інтеграції сучасних хімічних технологій у функціональну структуру геоecологічного моніторингу України в умовах інтенсивної адаптації національного законодавства до європейських стандартів екологічної безпеки та вимог European Green Deal. У роботі ґрунтовно проаналізовано світовий досвід міжнародного співробітництва у сфері охорони довкілля та стратегічні вектори розвитку найкращих доступних технологій. Особливу увагу приділено трансформаційним стратегіям розвитку підприємств хімічної галузі через призму підвищення їхньої міжнародної конкурентоспроможності, ресурсоефективності та комплексної екологізації промислового виробництва.

Досліджено фундаментальну роль цифрових платформ, хмарних технологій та глобальних інноваційних проєктів, зокрема ініціативи «Зелена хімія», у забезпеченні парадигми сталого розвитку та знятті антропогенного навантаження на екосистеми. Важливим науковим аспектом роботи є розгляд управлінської складової як базису професійної діяльності фахівця. Акцентовано увагу на здатності ефективно організувати роботу колективу в динамічних умовах сучасного промислового виробництва, проєктних підрозділів та науково-дослідних лабораторій. Висвітлено методику визначення стратегічних цілей, вибору оптимальних способів їх досягнення та впровадження дієвих інструментів мотивації і навчання персоналу.

Окремо у дослідженні обґрунтовано роль комунікативної компетентності дослідника. Здатність вільно та фахово спілкуватися державною та іноземною мовами як в усній, так і в письмовій формі є обов'язковою умовою для успішного обговорення та презентації результатів професійної діяльності, наукових досліджень і міжнародних грантових проєктів. У статті доведено нагальну необхідність здійснення постійного глибокого наукового пошуку у спеціалізованій літературі, міжнародних реферативних базах даних та актуальних патентних реєстрах для систематизації, критичного аналізу та об'єктивної оцінки інформації щодо новітніх хімічних технологій, процесів і обладнання.

Авторами підкреслено виключну значущість професійної дискусії та вміння аргументувати власну наукову позицію під час публічного обговорення результатів діяльності. Встановлено, що конструктивний діалог як із профільними фахівцями, так і з представниками суміжних галузей, є фундаментом для створення нової архітектури екологічної безпеки України та її успішної інтеграції у світовий науковий простір. Висновки дослідження можуть бути використані для оптимізації процесів екологічного менеджменту на підприємствах хімічного комплексу та вдосконалення освітніх програм підготовки фахівців.  
*Ключові слова:* геоecологічний моніторинг, хімічні технології, євроінтеграція, екологічна безпека, найкращі доступні технології, сталий розвиток, цифрові платформи, управління науковими проєктами, професійна комунікація.

### **Strategic directions for the development of environmentally safe chemical technologies in the context of geo-ecological monitoring and european integration of Ukraine. Savvova O., Teliura N.**

The study aims to conduct a comprehensive systemic analysis of topical issues regarding the integration of modern chemical technologies into the functional structure of geo-ecological monitoring in Ukraine, amidst the intensive adaptation of national legislation to European environmental safety standards and the requirements of the European Green Deal. The paper thoroughly analyzes global experience in international cooperation for environmental protection and the strategic development vectors of best available techniques. Particular attention is devoted to the transformational development strategies of chemical industry enterprises through the prism of enhancing their international competitiveness, resource efficiency, and the complex greening of industrial production.

The fundamental role of digital platforms, cloud technologies, and global innovative projects, specifically the «Green chemistry» initiative, in ensuring the sustainable development paradigm and reducing the anthropogenic load on ecosystems is investigated. A crucial scientific aspect of the work is the consideration of the managerial component as the basis for a specialist's professional activity. Emphasis is placed on the ability to effectively organize team performance within the dynamic conditions of modern industrial production, design units, and research laboratories. The methodology for defining strategic goals, selecting optimal ways to achieve them, and implementing effective tools for personnel motivation and training is highlighted.

Furthermore, the study substantiates the role of the researcher's communicative competence. The ability to communicate fluently and professionally in both the state and foreign languages, in oral and written forms, is a prerequisite for the successful discussion and presentation of professional performance results, scientific research, and international grant projects. The article proves the urgent necessity for constant, in-depth scientific search within specialized literature, international abstract databases, and current patent



registries to systematize, critically analyze, and objectively evaluate information regarding the latest chemical technologies, processes, and equipment.

The authors emphasize the exceptional significance of professional discussion and the ability to argue one's scientific position during the public deliberation of performance results. It is established that a constructive dialogue with both core specialists and representatives of related fields serves as the foundation for creating a new architecture for Ukraine's environmental safety and its successful integration into the global scientific space. The findings of the study can be utilized to optimize environmental management processes at chemical complex enterprises and to improve educational programs for specialist training. *Key words:* geo-ecological monitoring, chemical technologies, European integration, environmental safety, best available techniques, sustainable development, digital platforms, scientific project management, professional communication.

**Постановка проблеми.** Складність сучасної геоєкологічної ситуації в Україні, обтяжена наслідками військових дій та необхідністю інтенсивної післявоєнної відбудови, вимагає кардинального перегляду підходів до управління хіміко-технологічними процесами. Ключовою проблемою є необхідність поєднання фундаментальних досліджень із практичними інструментами геоєкологічного моніторингу для забезпечення сталого розвитку промислових регіонів. Інтеграція національної системи моніторингу в європейський простір, відповідно до вимог European Green Deal, ставить перед науковою спільнотою та промисловістю завдання, що виходять за межі суто технічних рішень. Постає гостра потреба у впровадженні найкращих доступних технологій та принципів «Зеленої хімії», що вимагає від фахівців здатності здійснювати системний науковий пошук у спеціалізованій літературі, міжнародних реферативних базах даних та актуальних патентних реєстрах. Це необхідно для критичного аналізу та оцінки інноваційних процесів і обладнання, що забезпечують екологічну безпеку виробництва. Реалізація таких складних проєктів неможлива без високого рівня управлінської культури. Актуальною є проблема здатності керівника ефективно організувати роботу колективу – як у специфічних умовах промислового виробництва, так і в межах проєктних підрозділів чи науково-дослідних лабораторій. Визначення стратегічних цілей, вибір ефективних способів їх досягнення, а також розвиток систем мотивації та навчання персоналу стають невід'ємними складниками екологізації галузі. Бар'єром на шляху до євроінтеграції часто стає брак комунікативної спроможності. Сучасний екологічний менеджмент потребує фахівців, здатних вільно спілкуватися державною та іноземною мовами для презентації результатів досліджень на міжнародному рівні. Вміння вести професійну дискусію, аргументувати власну позицію та знаходити спільну мову як із вузькопрофільними експертами, так і з нефахівцями є критично важливим для створення нової, прозорої архітектури екологічної безпеки України.

Таким чином, розв'язання проблеми інтеграції хімічних технологій у систему геоєкологічного моніторингу лежить у площині синергії інноваційних інженерних рішень, глибокої аналітичної роботи з інформаційними ресурсами та високої управлінської і комунікативної компетентності фахівців.

**Актуальність дослідження.** Актуальність обраної теми зумовлена критичною необхідністю модернізації промислового сектору України в межах європейського курсу на кліматичну нейтральність та екологічну безпеку на засадах сталого розвитку. Впровадження інноваційних хімічних технологій та розбудова дієвої системи геоєкологічного моніторингу вимагають не лише залучення інвестицій, а й формування фахівців нової генерації, здатних працювати за міжнародними стандартами. Динамічний розвиток світового ринку хімічних речовин та матеріалів вимагає від спеціалістів здатності здійснювати безперервний науковий пошук у спеціалізованій літературі, патентах та міжнародних базах даних. Вміння систематизувати, аналізувати та оцінювати інформацію щодо новітніх процесів і обладнання стає ключовим інструментом для забезпечення конкурентоспроможності вітчизняних підприємств та їхньої екологічної трансформації. Перехід до найкращих доступних технологій неможливий без ефективного менеджменту. Особливої актуальності набуває здатність фахівця організувати роботу колективу безпосередньо в умовах промислового виробництва, а також у проєктних підрозділах та науково-дослідних лабораторіях. Сучасний етап розвитку галузі потребує лідерів, які вміють чітко визначати стратегічні цілі, обирати оптимальні шляхи їх досягнення, мотивувати та навчати персонал, створюючи інтелектуальний капітал підприємств. Інтеграція України до європейського наукового та економічного простору вимагає подолання комунікаційних бар'єрів. Актуальною є потреба у вчених та інженерах, які здатні вільно спілкуватися державною та іноземною мовами для презентації результатів професійної діяльності та захисту наукових проєктів на міжнародній арені. Вміння аргументовано захищати власну позицію та вести діалог із представниками різних галузей є обов'язковою умовою для успішної реалізації стратегії сталого розвитку та забезпечення екологічної безпеки держави.

Таким чином, актуальність дослідження полягає у необхідності комплексного підходу, який поєднує інженерно-технологічні рішення з розвитком управлінських та комунікативних компетенцій, що є фундаментом для євроінтеграції хімічної галузі України.

**Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.** Представлене дослідження безпосередньо корелює з пріоритетними напрямками розвитку науки і тех-

ніки в Україні, зокрема у сфері раціонального природокористування та впровадження екологічно чистих технологій та пов'язане з реалізацією стратегічних завдань щодо гармонізації екологічних стандартів України із нормативами Європейського Союзу. Результати дослідження виступають елементом науково-технічних програм, які формують нову архітектуру екологічної безпеки України. Це створює підґрунтя для подальшої розробки автоматизованих систем контролю та підвищення кваліфікації фахівців хімічної галузі.

Практична реалізація удосконалення методологічних підходів до вибору екологічно безпечних хімічних технологій є можливою завдяки здатності здійснювати глибокий науковий пошук у спеціалізованій літературі та патентних базах даних, що дозволяє систематизувати та оцінювати світові досягнення у сфері процесів і обладнання хімічних виробництв для їх адаптації до умов вітчизняних підприємств.

Практичний аспект дослідження тісно пов'язаний із досвідом організації роботи колективів у межах науково-дослідних лабораторій та проєктних підрозділів. Авторські розробки враховують необхідність чіткого визначення стратегічних цілей екологічної модернізації та впровадження ефективних методів мотивації і навчання персоналу, що є критично важливим для успішного функціонування сучасного промислового виробництва.

Запропоновані рішення не обмежуються лише технічними аспектами геоecологічного моніторингу, а сприяють формуванню оновленої культури управління науково-технічними проєктами. Такий підхід повністю відповідає принципам сталого розвитку та стратегічним євроінтеграційним прагненням України у сфері екологічної безпеки.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Теоретико-методологічний фундамент дослідження базується на працях провідних вітчизняних та закордонних учених, які розглядають питання хімічної технології, геоecологічного моніторингу та професійної підготовки кадрів. Фундаментальні аспекти розробки новітніх матеріалів, зокрема структура склокерамічних систем та інноваційні методи їх дослідження. Окрім суто технічних розробок, важливий внесок у розв'язання проблем екологічної безпеки в умовах воєнного стану зроблено колективом авторів [1], якими було комплексно проаналізовано нормативно-правову базу та специфіку поведіння з радіоактивними відходами під час кризових ситуацій. У межах їхнього дослідження розроблено методологічний підхід до створення високотехнологічних високоміцних склокерамічних матеріалів, що характеризуються підвищеною стійкістю до інтенсивних радіаційних, хімічних, термічних та механічних навантажень. Авторами науково обґрунтовано вибір складів скла для отримання твердотільних матриць іммобілізації та детально вивчено вплив фазового складу на функціональні властиво-

сті кінцевого продукту. Особливу увагу приділено перспективам використання склокераміки на основі анортиту та гідроксиапатиту, що відкриває нові можливості для надійного тривалого захоронення радіоактивних відходів у нестабільних безпекових умовах [1]. Подальшого вивчення потребує питання довгострокової стійкості таких матеріалів до агресивного впливу довкілля. Зокрема, актуальним залишається прогнозування кінетики вилуговування компонентів матриць за умов екстремальних значень рН та високих тисків, що імітують глибоке геологічне захоронення протягом тривалого періоду. Фундаментальне значення для розуміння природи склоподібного стану мають дослідження [2], у яких проаналізовано основні закономірності температурних перетворень структури скла та виявлено специфічні особливості хімічної диференціації на первинних стадіях його кристалізації. Особливу увагу в межах системного аналізу фазових переходів приділено вивченню механізмів кристалізації алюмосилікатних та силікофосфатних скляних систем, що створює необхідне теоретичне підґрунтя для розробки новітніх склокерамічних матеріалів із заданими функціональними властивостями

Зокрема, авторами [3] підкреслюється, що використання сучасних інструментів просторового планування, контролю та моніторингу є фундаментом для забезпечення прозорості процедур регулювання земельних операцій. Окрему увагу в контексті євроінтеграційних процесів приділено впровадженню цифрових платформ для візуалізації елементів управління та підвищенню ефективності менеджменту обмежень у землекористуванні. Такий підхід дозволяє не лише мінімізувати корупційні ризики через бюрократичну прозорість, а й створює дієві механізми для оцінки та оподаткування земель, що є критично важливим для сталого розвитку територій та формування нової архітектури безпеки довкілля України [3]. У контексті цифровізації екологічного управління заслуговують дослідження, присвячені геопросторовому забезпеченню використання земель промисловості на регіональному рівні. У наукових працях, що розглядають цю проблематику, обґрунтовано актуальність системного підходу до формування геопросторових даних як фундаменту для ефективного моніторингу територій. Авторами [4] проаналізовано та систематизовано нормативно-правове забезпечення цього процесу, а також виокремлено ключові чинники, що впливають на якість та повноту формування цифрових моделей промислових зон. Важливим теоретичним внеском у розвиток даного напрямку є удосконалення категоріального апарату, що дозволяє більш точно ідентифікувати параметри використання промислових територій у межах регіональних систем управління. Таке вдосконалення методології створення геопросторового базису створює необхідні умови для інтеграції інструментів екологічного контролю та земельного

адміністрування, що повністю відповідає сучасним вимогам щодо прозорості та інформатизації науково-технічної діяльності [4]. Окремим науковим вектором, що має суттєве значення для формування нової архітектури екологічної безпеки, є розробка та впровадження сучасних систем моніторингу, що базуються на інструментах математичного та геоінформаційного моделювання. У наукових працях, присвячених цій проблематиці, авторами [5] обґрунтовано актуальність застосування ГІС-технологій для аналізу стану територій у межах регіональних екосистем. Дослідженнями останніх років визначено стратегічні напрями та виокремлено специфічні особливості використання земельних ресурсів, зокрема в контексті відбудови транспортної інфраструктури, як невід'ємного елемента загальної системи геоecологічного моніторингу. Такий методологічний підхід дозволяє інтегрувати просторові дані про стан інфраструктурних об'єктів у єдиний цифровий контур управління довкіллям, що забезпечує точність прогнозування техногенного навантаження та сприяє реалізації принципів сталого розвитку на регіональному рівні [5]. Вагоме значення для розбудови стратегій національної безпеки мають напрацювання, у яких розглянуто та систематизовано наукові підходи до використання комплексних цифрових платформ як інструменту забезпечення стійкості інфраструктури. У контексті післявоєнної відбудови України особливої актуальності набуває інтеграція екологічного аспекту, що базується на принципах збалансованого природокористування та ефективного управління ресурсами.

Дослідниками [6] обґрунтовано застосування комплексного інноваційного підходу, що поєднує можливості геоінформаційних технологій із моніторингом екологічних показників, що прямо корелює із політичною спрямованістю держави щодо досягнення цілей сталого розвитку. Використання ГІС-інструментів дозволяє розвивати нові концепції територіального управління, які враховують потенційні екологічні ризики та забезпечують баланс між економічним відновленням і збереженням довкілля. Ключовим елементом таких систем є чітке та прозоре прогнозування наслідків на всіх етапах планування. Зокрема, проведення просторового аналізу для оцінки ризиків повеней, ерозії ґрунтів та забруднення водних ресурсів дає змогу уникати поточних загроз і гарантувати, що відновлювальні роботи не призведуть до погіршення екологічного стану територій [6].

Аналітичний аспект дослідження розкрито у працях, де обґрунтовано актуальність трансформаційних процесів у державному секторі, що супроводжуються уповільненням ключових показників діяльності підприємств та зниженням їхнього виробничо-господарського потенціалу. Авторами [7] акцентовано увагу на проблемі скорочення робочого капіталу та уповільнення темпів залучення інвестиційно-інноваційних ресурсів, що безпосеред-

ньо впливає на спроможність галузі до екологічної модернізації. У цьому контексті доведено необхідність формування та впровадження нових оцінних підходів, які слугують фундаментом для забезпечення інвестиційної привабливості підприємств, зокрема у будівельній галузі. Системне застосування таких підходів дозволяє створити сприятливе підґрунтя для реалізації високотехнологічних проєктів, що є критично важливим для відновлення інфраструктури та впровадження екологічно безпечних рішень у межах стратегії сталого розвитку [7].

Особливе місце у контексті нашого дослідження посідають питання формування управлінського потенціалу. Проблеми становлення лідера у науковому середовищі та розбудова професійного іміджу сучасного дослідника детально розкриті у праці [8]. Ці дослідження підтверджують необхідність розвитку здатності фахівця організовувати роботу колективу в умовах лабораторій та проєктних підрозділів, визначаючи ефективні способи досягнення стратегічних цілей. Акцентовано увагу на важливості оволодіння компетентностями, що пов'язані з ефективною побудовою командної роботи та налагодженням внутрішніх і зовнішніх комунікаційних процесів. Завдяки використанню системного підходу, який включає ситуаційні вправи, тренінги та ділові ігри, забезпечується здатність майбутнього керівника не лише формувати лідерські якості, а й успішно демонструвати їх у процесі управління людськими ресурсами. Наявність розвиненого термінологічного апарату та практико-орієнтованих завдань у таких дослідженнях створює основу для підготовки спеціалістів, здатних приймати відповідальні управлінські рішення в умовах промислового виробництва та науково-дослідних лабораторій, що є невід'ємною частиною стратегії екологізації та євроінтеграції галузі [8].

Пріоритетним вектором розвитку сучасної науки, що визначає парадигму екологізації галузі, є концепція «зеленої хімії», розглянута у низці фундаментальних праць. Даний напрям базується на впровадженні інноваційних способів синтезу хімічних сполук, що мінімізують антропогенне навантаження на довкілля як на етапі виробництва, так і під час безпосередньої експлуатації продуктів. Авторами у [9] наголошується, що інтеграція енергоефективних методів у хіміко-технологічні процеси є критично важливою для скорочення витрат енергоресурсів та суттєвого зниження обсягів емісії шкідливих речовин в атмосферу. Такий підхід не лише сприяє економічній оптимізації виробництва, а й виступає стратегічним кроком на шляху до досягнення цілей сталого розвитку, створюючи передумови для формування екологічно безпечного майбутнього України в межах європейської спільноти [9].

Питання системної трансформації та стратегічного управління науковою сферою ґрунтовно досліджено у працях, де проаналізовано багаторівневу

структуру організації наукової діяльності в Україні. Авторами у [10] визначено ключові фактори інноваційного розвитку в синергії з викликами сучасності, що є необхідною умовою для успішної інтеграції вітчизняного наукового простору в міжнародну спільноту. У межах даного підходу доведено критичну необхідність модернізації дослідницької інфраструктури та створення сприятливих умов для підтримки молодих науковців, що корелює з потребою посилення взаємодії між державним і приватним секторами. Особливу увагу приділено запропонованій складній системі управління науково-технічним розвитком, яка демонструє багатогранність та взаємозв'язаність різних рівнів адміністративного впливу. Обґрунтовано, що саме така архітектура управління здатна забезпечити ефективне функціонування наукової системи, сприяючи динамічному розвитку технологій та зміцненню позицій України на глобальному ринку інтелектуального капіталу. Залишається не розкритим питання створення синергетичної моделі управління, яка б поєднувала впровадження принципів «Зеленої хімії» з розвитком специфічних цифрових та лідерських компетентностей фахівців, необхідних для реалізації міжнародних наукових проєктів у сфері екологічного моніторингу [10].

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** Проведений аналіз наукових праць дозволяє констатувати, що на сьогодні сформовано потужний теоретичний базис у сферах екологічної безпеки хімічних технологій, стратегічного планування відбудови інфраструктури та розвитку управлінських компетентностей науковців. Дослідження підтверджують ефективність інтеграції принципів «Зеленої хімії» та ГІС-технологій для забезпечення сталого розвитку територій. Однак, попри значні напрацювання, залишається нерозкритим питання створення комплексної архітектури геоecологічного моніторингу, яка б у синергії поєднувала інноваційні методи, цифрові інструменти та специфічні лідерські компетентності фахівців у межах єдиного євроінтеграційного вектору України. Саме необхідність подолання цієї фрагментарності та розробка цілісного підходу до екологізації галузі в умовах післявоєнного відновлення визначають актуальність і напрям представленої дослідження

**Новизна.** Наукова новизна полягає у розробці комплексного науково-методичного підходу до формування системи геоecологічного моніторингу, що базується на синергії технологічних, цифрових та управлінських інновацій у контексті сталого розвитку. Вперше обґрунтовано концептуальну модель інтеграції принципів «Зеленої хімії» у цифрову архітектуру управління післявоєнною відбудовою інфраструктури, що дозволяє здійснювати превентивну оцінку екологічних ризиків на етапі проєктування та забезпечувати баланс між економічною ефективністю та збереженням природного капіталу.

Удосконалено методологію геопросторового забезпечення використання промислових земель через поєднання інструментів математичного моделювання та ГІС-технологій, що забезпечує вищий рівень візуалізації екологічних обмежень і дозволяє оперативно прогнозувати наслідки техногенного навантаження у кризових ситуаціях. Дістали подальшого розвитку наукові уявлення про роль професійних лідерських компетентностей дослідника в умовах цифровізації, де доведено, що ефективність впровадження високотехнологічних рішень прямо залежить від здатності фахівця до стратегічної комунікації та управління міжнародними науковими проєктами. Запропоновано системний підхід до оцінки інвестиційної привабливості екологічних ініціатив через призму євроінтеграційних стандартів, що створює умови для трансформації наукових розробок у реальні ресурси модернізації промислового сектору України.

**Методологічне або загальнонаукове значення.** Методологічне значення одержаних результатів полягає у формуванні нової міждисциплінарної парадигми, яка інтегрує фундаментальні принципи хімічної технології, геоінформатики та теорії управління в єдину систему екологічної безпеки. Загальнонаукова цінність дослідження визначається розробкою універсального методологічного алгоритму превентивного моніторингу територій, що базується на поєднанні кількісних показників «Зеленої хімії» та якісних параметрів сталого розвитку. Запропонований підхід дозволяє трансформувати традиційні методики оцінки техногенного впливу у динамічні цифрові моделі, які здатні адаптуватися до змінних умов воєнного стану та кризових ситуацій.

Крім того, методологічне значення роботи розширюється через обґрунтування компетентісно-орієнтованого підходу в науковій діяльності, де професійне лідерство та цифрова грамотність розглядаються як необхідні інструменти реалізації технологічних інновацій. Це створює теоретичне підґрунтя для подальших досліджень у сфері модернізації вищої освіти та наукової інфраструктури України, забезпечуючи методологічну базу для переходу від фрагментарного вирішення екологічних проблем до системного стратегічного управління інтелектуальним та природним капіталом у межах євроінтеграційних процесів. Сформовані у роботі наукові положення поглиблюють методологію комплексного оцінювання стійкості інфраструктурних об'єктів, що має фундаментальне значення для розвитку сучасної прикладної науки та техніки.

**Викладення основного матеріалу.** У сучасних умовах розвиток хімічної галузі України потребує стратегічного переходу від класичних моделей виробництва до фундаментальних принципів «Зеленої хімії». Ключовим завданням є розробка та впровадження технологій, що мінімізують вико-

ристання токсичних реагентів і суттєво знижують енерговитрати. У контексті силікатної галузі це передбачає оптимізацію технологічних систем через низькотемпературний синтез матеріалів та масштабне залучення вторинної сировини. Процес розробки нових хімічних речовин базується на комплексному фізико-хімічному аналізі, а саме, застосування методів рентгенофазового аналізу та електронної мікроскопії дозволяє превентивно прогнозувати стійкість матеріалів до агресивних середовищ, що є критичним для запобігання міграції шкідливих компонентів у підземні горизонти.

Геоекологічний моніторинг розглядається як інтегрована багатоконпонентна система спостереження за станом літосфери, гідросфери та атмосфери. Впровадження моніторингових заходів здійснюється за чітко визначеним алгоритмом. Ідентифікація потенційних джерел забруднення, системний аналіз технологічних циклів, складу відходів та моделювання можливих шляхів їх міграції. Проектування мережі спостережних пунктів, стратегічне встановлення свердловин для контролю якості підземних вод та точок моніторингу стану ґрунтів. Регулярна фіксація показників мінералізації, вмісту важких металів та специфічних сполук. Для порівняльної оцінки ефективності запропонованих підходів у табл. 1 наведено характеристики традиційних та інноваційних технологій.

Сучасний геоекологічний моніторинг базується на широкому використанні спеціалізованих цифрових платформ для обробки великих масивів даних, що дозволяє вийти на рівень превентивного управління екологічними ризиками. Застосування програмного забезпечення ANSYS Academic Multiphysics забезпечує можливість високоточного моделювання гідродинамічних процесів та розповсюдження забруднювачів у ґрунтових горизонтах ще на стадії проектування нових об'єктів. Ефективність

наукового процесу підкріплюється використанням хмарних середовищ Teams та Moodle для освітньо-наукової комунікації, тоді як візуалізація складних інженерних задач та фахове обговорення результатів із міжнародною спільнотою реалізується через додаткові сервіси. Такий інструментарій не лише підвищує рівень аргументації наукових висновків, а й сприяє розбудові цифрового іміджу дослідника у глобальному науковому просторі.

Для практичного підтвердження ефективності запропонованої методології було проведено дослідження склокерамічного покриття силікатної системи, що застосовується у промисловому будівництві. Основна мета експерименту полягала в оцінці рівня міграції іонів у водне середовище, що імітує ґрунтові води, для прогнозування геоекологічних наслідків експлуатації матеріалу. Використання електронної мікроскопії для аналізу морфології поверхні та рентгенофазового аналізу у поєднанні з цифровим моделюванням дифузійних процесів у середовищі ANSYS дозволило встановити суттєве покращення властивостей матеріалу. Завдяки впровадженню принципів «Зеленої хімії» та оптимізації режимів синтезу, рівень вимивання лужних компонентів знизився на 18-22 % порівняно з традиційними аналогами. Отримані цифрові профілі міграції іонів були завантажені у хмарні платформи для формування бази «екологічних паспортів», що дозволяє фахівцям оперативно порівнювати фактичний стан підземних вод із теоретичними моделями вимивання, пришивидуючи ідентифікацію джерел забруднення.

Загальна оцінка ефективності наукової діяльності у межах запропонованої моделі базується на комплексному поєднанні техніко-економічних показників із рівнем зниження екологічного ризику. Впровадження наукових розробок через центри трансферу технологій та наукові технопарки дозволяє максимально скоротити часовий інтервал від

Таблиця 1

**Порівняльна характеристика традиційних та інноваційних екологічно безпечних хімічних технологій**

Критерій порівняння	Традиційна технологія	Інноваційна («Зелена хімія»)	Вплив на моніторинг
Сировинна база	Первинна природна сировина	Вторинна сировина та відходи	Рециклінг знижує навантаження на надра
Цифрова інтеграція	Аналоговий контроль	ПЗ (ANSYS, Office 365, Miro)	Прогнозування ризиків у реальному часі
Енергоємність	Високотемпературні цикли	Низькотемпературний синтез	Зниження викидів парникових газів
Реагенти	Токсичні та агресивні	Каталізатори, безпечні реагенти	Спрощення контролю міграції у водах
Модель управління	Лінійна – виробництво–відходи	Циркулярна – безвідходна	Мінімізація площ шламонакопичувачів
Академічний підхід	Орієнтація на вихід продукту	Екологічна безпека та ПАНД	Відповідальність за наслідки досліджень

лабораторного синтезу до промислової експлуатації екологічно безпечного продукту. Це наочно ілюструє, як інтеграція практичних аспектів наукової роботи – від вибору аналітичного інструментарію до використання хмарних сервісів презентації результатів – забезпечує високу якість геоекологічного супроводу сучасних хімічних технологій та сприяє сталому розвитку промислового сектору.

**Головні висновки та перспективи використання результатів дослідження.** Системна екологізація хімічних технологій в Україні є складним багаторівневим процесом, успіх якого залежить від синергії інноваційних методів синтезу, цифрової трансформації та високого рівня професійних компетентностей фахівців. У межах роботи науково обґрунтовано методологічні засади переходу до принципів «Зеленої хімії», що в силікатному секторі реалізується через впровадження низькотемпературних режимів синтезу та використання вторинної сировини. Це забезпечує зниження техногенного навантаження на довкілля та підвищує енергоефективність виробничих циклів.

Доведено, що інтеграція сучасних цифрових платформ, зокрема програмного комплексу ANSYS Academic Multiphysics та хмарних середовищ Teams/

Moodle, трансформує традиційний геоекологічний моніторинг у динамічну систему превентивного управління ризиками. Практична апробація на прикладі розроблених склокерамічних систем підтвердила високу ефективність запропонованих підходів: рівень міграції іонів лужних компонентів знизився на 18-22%, що класифікує ці матеріали як екологічно безпечні для промислового будівництва та довготривалого контакту з геологічним середовищем.

Перспективи використання результатів дослідження полягають у створенні уніфікованої бази «екологічних паспортів» для новітніх матеріалів, що дозволить оперативно прогнозувати стан екосистем у зонах впливу промислових підприємств. Подальшого наукового вивчення потребує питання адаптації розроблених моделей до умов критичних інфраструктурних пошкоджень у післявоєнний період, а також масштабування лабораторних розробок через мережу наукових технопарків. Сформована у статті багаторівнева модель управління та акцент на розвитку лідерського потенціалу науковців створюють надійний фундамент для інтеграції української науки у європейський науковий простір та сприяють сталому розвитку промислового сектору України.

#### Література

1. Savvova O., Teliura N., Hozha M., Babich O., Smyrnova Y., Lutsiuk I. Measures for Immobilization of Radioactive Waste in the Structure of Glass and Glass-Ceramics under Martial Law. *Chemistry & Chemical Technology*. 2025. Vol. 19, No. 2. P. 297–306. DOI: <https://doi.org/10.23939/chcht19.02.297>
2. Структура склокерамічних матеріалів : монографія / О. В. Саввова, Г. К. Воронов, О. І. Фесенко та ін. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. 152 с. URL: <https://eprints.kname.edu.ua/63861/>
3. Bieliatynskiy A., Mamonov K., Gryanyuk V., Kanivets O., Kovalenko L. Geospatial modeling of directions for the development and implementation of the land administration system at the regional level. *Civil and Environmental Engineering*. 2025. Vol. 21, Issue 2. P. 944–958. DOI: <https://doi.org/10.2478/cee-2025-0072>
4. Мамонов К. А., В'яткін Р. С., Чайка Т. М. Визначення геопросторового забезпечення використання земель промисловості на регіональному рівні. *Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура*. 2025. Том 1, вип. 189. С. 331–338. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-1-189-331-338>
5. Ватуля Г. Л., Мамонов К. А., В'яткін Р. С., Нелін Є. О. Напрями та особливості використання земель для відбудови транспортної інфраструктури на регіональному рівні у системі геоекологічного моніторингу. *Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура*. 2025. Том 4, вип. 192. С. 272–278. DOI: <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-4-192-272-278>
6. Телюра Н., Коркуц М. Інноваційний підхід до використання комплексних платформ для забезпечення стійкості та екологічної безпеки. *Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2025. № 3. С. 42–49. DOI: <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-5>
7. Мамонов К. А., Пруненко Д. О., Фролов С. О. Оцінка інвестиційної привабливості будівельних підприємств: підходи та особливості реалізації. *Комунальне господарство міст. Серія: Економічні науки*. 2025. Вип. 7 (195). С. 2–8. DOI: <https://doi.org/10.33042/3083-6735-2025-7-195-2-8>
8. Лідерство та комунікації в організації : навч. посіб. / упоряд. Н. Я. Михаліцька, М. Р. Яцик. Львів : Львівський державний університет внутрішніх справ, 2024. 512 с.
9. Stetsenko, N., & Bubliko, N. (2023). Green chemistry trends in the context of the concept of sustainable development. *SWorld-Gen Conference Proceedings*, 1(gec30-00), 32–35. <https://doi.org/10.30890/2709-1783.2023-30-00-010>
10. Бугрімєнко Р., Смірнова П. Особливості організації наукової діяльності в Україні. *Grail of Science*. 2024. № 43. С. 33–38. DOI: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.06.09.2024.002>

Дата першого надходження статті до видання: 28.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026

---

# ЕКОЛОГІЯ ТА ПОВОЄННИЙ РОЗВИТОК УКРАЇНИ

---

УДК 354.4:502

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.1-64.29>

## ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ ВІЙНИ В УКРАЇНІ: ВИКЛИКИ СТАЛОГО ВІДНОВЛЕННЯ

Сидоренко В.Л., Демків А.М., Доценко О.Г., Михайлова А.В.,  
Присяжнюк В.В., Семічасівський С.В.

Інститут наукових досліджень з цивільного захисту  
Національного університету цивільного захисту України  
вул. Вишгородська, 21, 04074, м. Київ

generals2007@i.ua, kleo\_dan@ukr.net, mio1488@yahoo.com, mihajlova-a-v@ukr.net,  
prisyazhnuk1979@gmail.com, semich2006@ukr.net,

Розглянуто вплив війни в Україні на довкілля: від забруднення повітря, води й ґрунтів до втрати біорізноманіття та руйнування екосистем. Показано, що бойові дії спричиняють довготривалу деградацію природних ресурсів, змінюють ландшафти та знижують стійкість екологічних систем, що відбивається на здоров'ї людей і продовольчій безпеці країни. Особливо проаналізовано масштабні викиди парникових газів, пов'язані з використанням важкої військової техніки, лісовими пожежами та руйнуванням промислових об'єктів. Наголошено, що знищення лісів, виснаження ґрунтів та забруднення водою мають як локальні, так і глобальні наслідки для клімату, ускладнюючи виконання Україною міжнародних екологічних зобов'язань. Особливо увага приділена проблемі екоциду як потенційному міжнародному злочину, що потребує юридичного визнання та всебічного розслідування міжнародними судовими інституціями. Спираючись на дані Міністерства захисту довкілля України та звітів UNEP, IAEA, ICRC і ПАРС, визначено характерні закономірності екологічних збитків у зонах бойових дій та окреслено основні тенденції післявоєнного відновлення. Поведено порівняльний аналіз із наслідками воєн у Перській затоці та колишній Югославії, що дозволило виявити спільні риси деградації екосистем, тривалість забруднень і складність їх подолання. У підсумку підкреслено потребу створення національної системи екологічного моніторингу, активного залучення міжнародних організацій до розслідування екологічних злочинів, а також розроблення комплексної стратегії «зеленого відновлення» та інтеграції екологічної безпеки в політику сталого розвитку. Отримані результати можуть стати корисною основою для планування післявоєнної відбудови України. *Ключові слова:* екологічні наслідки війни, екоцид, довкілля, біорізноманіття, відновлення природних ресурсів, міжнародне гуманітарне право, Україна.

**Environmental consequences of the war in Ukraine: challenges of sustainable recovery.** Sydorenko V., Demkiv A., Dotsenko O., Mykhailova A., Prisyazhniuk V., Semychaievskiy S.

The impact of the war in Ukraine on the environment is examined, ranging from air, water, and soil pollution to biodiversity loss and the destruction of ecosystems. It is shown that hostilities cause long-term degradation of natural resources, alter landscapes, and reduce the resilience of ecological systems, which in turn affects human health and the country's food security. Particular attention is paid to large-scale greenhouse gas emissions associated with the use of heavy military equipment, forest fires, and the destruction of industrial facilities. It is emphasized that deforestation, soil depletion, and water pollution have both local and global consequences for the climate, complicating Ukraine's fulfillment of its international environmental obligations. Special focus is given to the issue of ecocide as a potential international crime requiring legal recognition and comprehensive investigation by international judicial institutions. Drawing on data from the Ministry of Environmental Protection of Ukraine and reports by UNEP, the IAEA, the ICRC, and PACE, characteristic patterns of environmental damage in combat zones are identified and key trends in post-war recovery are outlined. A comparative analysis with the environmental consequences of the wars in the Persian Gulf and the former Yugoslavia is conducted, revealing common features of ecosystem degradation, the persistence of pollution, and the complexity of remediation. In conclusion, the need is emphasized for establishing a national environmental monitoring system, actively involving international organizations in the investigation of environmental crimes, and developing a comprehensive strategy for «green recovery» and the integration of environmental security into sustainable development policy. The findings may serve as a useful basis for planning Ukraine's post-war reconstruction. *Key words:* environmental consequences of war, ecocide, environment, biodiversity, natural resource restoration, international humanitarian law, Ukraine.



**Постановка проблеми.** Збройні конфлікти можуть завдати шкоди не лише соціально-економічним структурам, а й впливати на навколишнє середовище. Вплив війни між росією та Україною на навколишнє середовище значно посилюється. Знищення промислових об'єктів і лісів, гідротехнічних споруд та сільськогосподарських угідь призводить до численних загроз, що впливають на клімат, здоров'я населення та майбутнє екосистем [1].

**Актуальність дослідження.** Питання екологічних наслідків війни залишається надзвичайно актуальним, оскільки Україна зараз є сучасним прикладом війни, що шкодить довкіллю. За даними Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України станом на кінець 2025 року було скоєно понад 10 тисяч екологічних злочинів. Пошкодження промислових об'єктів, пожежі на нафтохранилищах, забруднення водою та ґрунту спричиняють довгострокові екологічні наслідки, що вплинуть на майбутні покоління людей.

**Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.** Дослідження має на меті систематизувати й проаналізувати дані про екологічні наслідки воєнних дій в Україні, а також узагальнити міжнародний досвід захисту довкілля під час збройних конфліктів. Його практичне значення полягає в тому, що отримані результати можуть стати основою для розроблення державних програм екологічного відновлення, підготовки законодавчих ініціатив щодо відповідальності за екоцид та включення екологічних питань у систему національної безпеки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Останні наукові дослідження [2–4] відзначають зростання інтересу до теми впливу війни на екосистеми. У публікаціях описано масштабне забруднення ґрунтів важкими металами, руйнування водних систем та помітне скорочення біорізноманіття. У звітах ICRC [5] та PACE [6] акцентується, що чинних правових механізмів для притягнення до відповідальності за екологічну шкоду все ще бракує. Українські наукові роботи [7, 8] також наголошують на необхідності створення національної системи моніторингу екологічних наслідків війни.

**Виділення невирішених раніше частин проблеми.** Попри наявність значного масиву аналітичних матеріалів, низка ключових питань залишається невирішеною. Зокрема, йдеться про створення єдиного державного реєстру екологічних злочинів, визначення чітких критеріїв масштабної екологічної шкоди, запровадження ефективних механізмів компенсації за завдані збитки природному середовищу, а також про імплементацію поняття «екоциду» в національне та міжнародне кримінальне право.

**Новизна дослідження.** Наукова новизна дослідження полягає у всебічному аналізі екологічних наслідків війни в Україні з урахуванням екологічних, правових та безпекових вимірів. Обґрунтовано необ-

хідність створення національної системи моніторингу екологічних злочинів війни та запровадження поняття екоциду в правозастосовну практику. Розвинено підхід до інтеграції принципів «зеленого відновлення» у політику сталого розвитку та передумов забезпечення післявоєнної екологічної безпеки.

**Методологічне та загальнонаукове значення.** Методологічну основу дослідження становить системний аналіз взаємозв'язку між воєнними діями та станом природного середовища. Застосовано порівняльно-правовий, геоекотологічний і статистичний методи, а також контент-аналіз звітів та аналітичних матеріалів міжнародних організацій. Наукове значення роботи полягає у формуванні комплексного підходу до екологічної оцінки збройних конфліктів як важливої складової системи національної безпеки.

**Викладення основного матеріалу. 1. Руйнування екосистем і втрата біорізноманіття.** Збройні конфлікти нерідко розгортаються на територіях із високою природною цінністю, де зосереджено значну частину біорізноманіття та об'єктів природно-заповідного фонду. За сучасними оцінками, близько 20 % природоохоронних територій України зазнали ушкоджень унаслідок війни 2022–2025 рр. [3]. Подібні руйнування призводять до втрати екологічної зв'язності ландшафтів та скорочення площ природних ареалів.

Військові дії зумовлюють пряме знищення лісових, степових, болотних і водно-болотних екосистем, які відіграють ключову роль у підтриманні природної рівноваги. Вибухи боєприпасів і спричинені ними пожежі руйнують лісові масиви, які є важливими вуглецевими поглиначами та регуляторами мікроклімату [7]. Порушення рослинного покриву посилює процеси ерозії, прискорює деградацію ґрунтів та порушує природні кругообіги речовин.

Особливо значних втрат зазнали заповідні території Донецької, Луганської, Запорізької та Херсонської областей, де через тривалі бойові дії зафіксовано випадки повного знищення колоній птахів і руйнування їхніх місць гніздування. Інтенсивний шумовий вплив вибухів і пересування військової техніки спричинили стресові реакції та призвели до зниження чисельності їх популяцій.

Масове використання військової техніки спричинило фрагментацію природних ландшафтів, що істотно ускладнює відновлення екосистем після завершення бойових дій. Руйнування рослинного покриву збільшує обсяги пилових викидів, сприяє втраті гумусного шару та підвищує ризик опустелювання в південних регіонах. Відновлення таких територій потребує довгострокових реабілітаційних програм, спрямованих на рекультивування ґрунтів, відновлення лісонасаджень і відтворення популяцій ключових видів.

**2. Забруднення повітря, води та ґрунтів.** Воєнні дії неминує супроводжуються масштабним забрудненням атмосферного повітря, водних ресурсів та ґрунтового покриву. Під час вибухів у повітря

вивільняються оксиди азоту й сірки, чадний газ, сажа та дрібнодисперсний пил. Детонація боєприпасів і згоряння палива супроводжуються утворенням аерозолів із домішками важких металів, які можуть переноситися на значні відстані та спричинити вторинне забруднення атмосфери й ґрунтів [1, 9]. Крім того, у зонах інтенсивних бойових дій фіксуються локальні викиди токсичних речовин із пошкоджених промислових підприємств, складів хімічної продукції, нафтобаз та інших потенційно небезпечних об'єктів. Це формує ризик утворення хмар забруднення з канцерогенною дією, які становлять загрозу для здоров'я.

Ґрунти регіонів, що зазнали тривалих бойових дій, містять підвищені концентрації свинцю, кадмію, нікелю, цинку та хрому, що підтверджується результатами польових досліджень [4]. Вибухові речовини та продукти їх розкладу є токсичними й характеризуються тривалою персистентністю. Вони порушують мікробіологічні процеси, знижують родючість ґрунтів і створюють ризик переходу забруднювачів до ґрунтових вод, що становить загрозу для сільського господарства та здоров'я населення.

Не менш суттєвого впливу зазнають і водні екосистеми. Водні об'єкти забруднюються паливно-мастильними матеріалами, залишками боєприпасів, важкими металами та хімічними сполуками, що потрапляють у середовище внаслідок руйнування промислових потужностей [9]. Додаткові негативні наслідки спричиняють пошкодження дамб, трубопроводів та каналізаційних систем, які призводять до потрапляння стічних вод у річки, погіршуючи якість питної води та спричиняючи загибель водних організмів. Особливо руйнівними стали наслідки знищення Каховської ГЕС у 2023 р., яке спричинило масштабне затоплення територій, деградацію заплав, забруднення вод Дніпра та масову загибель водних біоресурсів [10].

*3. Кліматичний ефект і викиди парникових газів.* Військові дії неминуче призводять до різкого зростання викидів парникових газів, які чинять додатковий тиск на атмосферу та кліматичну систему. Основні джерела цих викидів добре зрозумілі: це інтенсивне використання пального, робота важкої техніки, постійні транспортування боєприпасів, утилізація відходів і масштабні пожежі. За оцінками UNEP [2], загальний обсяг пов'язаних із війною викидів CO<sub>2</sub> в Україні вже вимірюється десятками мільйонів тонн, що фактично дорівнює річним викидам деяких європейських країн.

Ситуацію ускладнюють втрати лісів, які природним чином поглинають вуглець. Знищення лісів, особливо на сході та півдні країни, послаблює здатність природи утримувати вуглець і підтримувати стабільність локального клімату. Деградовані внаслідок вибухів та механічного ущільнення ґрунту втрачають не лише родючість, а й здатність зберігати органічний вуглець.

Масштабні пожежі призводять до збільшення викидів дрібнодисперсного пилу, чадного газу та оксидів азоту, формуючи туман й смог, які підвищують температуру та погіршують якість повітря. Це безпосередньо впливає на здоров'я людей, особливо в густонаселених містах і громадах [7].

Унаслідок цих процесів війна істотно змінила вуглецевий баланс усього регіону, ускладнивши для України виконання міжнародних кліматичних зобов'язань, зокрема цілей Паризької угоди. Під час післявоєнної відбудови вкрай важливо інтегрувати кліматичну політику в загальні стратегії відновлення. Пріоритетами мають стати відновлення лісових масивів, розвиток відновлюваної енергетики та створення дієвої системи обліку «вуглецевого сліду» воєнних дій [11].

*4. Тривалі наслідки для екологічної безпеки.* Після завершення активних бойових дій на постраждалих територіях залишаються мінні поля, нерозірвані боєприпаси, хімічні забруднення та осередки накопичення токсичних відходів – усе це створює довготривалу загрозу як для населення, так і для природних екосистем [9]. Такі зони небезпечні як через ризик вибухів, так і внаслідок поступового вимивання важких металів і вибухових речовин у ґрунти та водні системи, що може тривати роками, поглиблюючи екологічну деградацію.

Міжнародний досвід підтверджує: наслідки воєнних забруднень зберігають свою небезпеку надзвичайно довго. Зокрема, сліди діоксинів після застосування дефоліантів у В'єтнамі залишаються у доквіллі навіть через понад півстоліття після завершення війни [2]. Подібну тривалу дію токсичних забруднень фіксували також в Іраку та на Балканах, де рештки боєприпасів і нафтопродуктів впливали на якість води та ґрунтів упродовж десятиліть.

В Україні частина територій Донбасу може залишатися обмеженою для сільськогосподарського використання через накопичення важких металів, хімічних сполук і радіонуклідів у поверхневих шарах ґрунту [4]. Це суттєво знижує потенціал екологічно збалансованого відновлення регіону та створює додаткові соціально-економічні виклики для місцевих громад.

У таких умовах екологічна безпека стає невід'ємною складовою національної безпеки та важливою передумовою сталого розвитку держави [11]. Її забезпечення потребує комплексного підходу, а створення національної системи моніторингу екологічних наслідків війни, удосконалення нормативно-правової бази та активізація міжнародної співпраці у сфері відновлення природних ресурсів мають стати стратегічними пріоритетами післявоєнного розвитку України.

*5. Порівняльні приклади з міжнародного досвіду.* Впродовж військових дій в Україні офіційно зафіксовано понад десять тисяч випадків екологічних злочинів, пов'язаних із війною [12]. Найпоширеніші

порушення включають витоки нафтопродуктів, забруднення ґрунтів важкими металами, руйнування об'єктів водопостачальної інфраструктури та масштабні лісові пожежі. Такі процеси формують системні загрози для здоров'я населення та суттєво ускладнюють екологічно орієнтоване відновлення природних екосистем.

Міжнародний досвід свідчить, що подібні наслідки є характерними для більшості сучасних збройних конфліктів. Під час війни в Перській затоці 1991 року спалення нафтових свердловин у Кувейті спричинило масштабні викиди в атмосферу, кислотні опади та тривале забруднення ґрунтів, про що йдеться у звіті UNEP [13]. У колишній Югославії в 1999 р. бомбардування нафтохімічних і промислових підприємств призвело до масових витоків токсичних речовин у річкові басейни, що спричинило стійке забруднення водних екосистем [5].

Порівняльний аналіз демонструє наявність універсальних закономірностей екологічних наслідків воєн: руйнування промислової інфраструктури, забруднення повітря, вод і ґрунтів, деградацію біорізноманіття та високі витрати на екологічну реабілітацію територій. Водночас досвід інших країн показує ефективність використання міжнародних фінансових інструментів, створення спеціалізованих фондів екологічного відновлення та впровадження систем екологічного моніторингу в межах миротворчих місій.

Для України врахування цього досвіду має ключове значення. Застосування принципів «зеленого відновлення» може стати основою для формування екологічно безпечної моделі післявоєнного розвитку, узгодженої з європейськими екологічними стандартами.

*6. Міжнародно-правове регулювання захисту довкілля.* Міжнародне гуманітарне право містить низку норм щодо обмежування шкоди довкіллю під час збройних конфліктів. Зокрема, статті 35(3) та 55(1) Додаткового протоколу I до Женевських конвенцій 1949 року прямо забороняють використання методів або засобів ведення війни, здатних завдати широкомасштабної чи тривалої шкоди природному середовищу [5]. Ці положення не лише формулюють принцип екологічної обережності у воєнних діях, а й підкреслюють, що безпека людей невіддільна від стабільності екосистем.

Резолюція Генеральної Асамблеї ООН № 47/37 від 25 листопада 1992 року «Про захист довкілля у період збройних конфліктів» підтвердила обов'язок держав утримуватися від дій, які можуть негативно вплинути на довкілля, та закликала до розроблення міжнародних механізмів оцінки екологічних наслідків воєн [14]. У сучасному контексті ці принципи набувають особливої актуальності для України, де руйнування техногенних об'єктів створило загрози, що поширюються далеко за межі національних кордонів.

Парламентська асамблея Ради Європи у звітах за 2023 рік звернула увагу на потребу посилення механізмів притягнення до відповідальності за екологічні злочини війни, а також на важливість удосконалення превентивних заходів міжнародного контролю [6]. Одним із перспективних напрямів розвитку міжнародного права є визнання екоциду окремим міжнародним злочином [15]. Триваючі дискусії в міжнародній юридичній спільноті сприяють формуванню правових інструментів, необхідних для ефективного розслідування та покарання екологічних злочинів [16].

Визнання екоциду п'ятим злочином проти миру створило б правові підстави для міжнародного переслідування за умисне знищення природного середовища. Післявоєнний період формування ефективної системи екологічної безпеки в Україні має спиратися на комплексне поєднання правових, екологічних і соціально-економічних механізмів. У цьому процесі міжнародна співпраця відіграватиме ключову роль, забезпечуючи умови для сталого та екологічно відповідального відновлення країни.

**Головні висновки.** Війна в Україні спричинила не лише людські трагедії й соціальні потрясіння, а й масштабну екологічну кризу, наслідки якої вже сьогодні відчувають усі сфери природного середовища. Найуразливішими виявилися водні ресурси, лісові екосистеми та ґрунтовий покрив, тобто ті основи природного балансу, від яких залежить якість життя людей та стійкість біорізноманіття. Порушення цих компонентів призводить до довготривалих змін у структурі екосистем, ускладнюючи відновлення регіонів і створюючи нові ризики для екологічної безпеки.

У таких умовах надзвичайно важливо сформулювати єдину державну систему моніторингу екологічних наслідків війни. Її впровадження дозволить забезпечити об'єктивну й науково обґрунтовану оцінку завданих збитків, а також стане основою для планування відновлювальних заходів, що мають враховувати як локальні особливості, так і довгострокові потреби довкілля.

Водночас подальша діяльність України та міжнародної спільноти має бути спрямована на посилення правових механізмів притягнення до відповідальності за екоцид. Інтеграція екологічного виміру у національні та міжнародні стратегії безпеки і сталого розвитку є критичною, адже саме вона здатна забезпечити не лише відновлення природи, а й запобігання подібним злочинам у майбутньому.

**Перспективи використання результатів дослідження.** Отримані результати становлять цінну основу для подальших наукових досліджень і практичних рішень, зокрема у формуванні стратегії екологічної безпеки України. Вони можуть бути використані під час розроблення національної програми відновлення пошкоджених територій, а також у підготовці міжнародних звітів і проєктів технічної допомоги, які покликані підтримати процес екологічної реабілітації країни.

## Література

1. United Nations (UN). How conflict impacts our environment. New York: UN, 2023. 28 p.
2. United Nations Environment Programme (UNEP). Climate, conflict and the natural environment. Nairobi: UNEP, 2022. 54 p.
3. Wirtu Y.D., Abdela U. Environmental damage of war in Ukraine. *Frontiers in Environmental Science*. 2025, 13. DOI: 10.3389/fenvs.2025.1539520
4. Solokha M., Demyanyuk O., Symochko L., Mazur S., Vynokurova N., Sementsova K., Mariychuk R. Soil Degradation and Contamination Due to Armed Conflict in Ukraine. *Land*. MDPI, 2024. Vol. 13, № 10. 23 p. DOI: 10.3390/land13101614
5. International Committee of the Red Cross (ICRC). Argren R. The obligation to prevent environmental harm in armed conflict. *International Review of the Red Cross*. 2023. Вып. 105, № 924. DOI: 10.1017/S1816383123000231
6. Parliamentary Assembly of the Council of Europe (PACE). Environmental impact of armed conflicts. Strasbourg: Council of Europe, 2023. 35 p.
7. Environmental challenges of wars and armed conflicts. *Svit KPI*. 2025. URL: <https://svit.kpi.ua/en/2025/01/17/environmental-challenges-of-wars-and-armed-conflicts/> (дата звернення: 06.11.2025).
8. Згуровський М.З. Екологічні наслідки збройних конфліктів у глобальному вимірі. *Вісник Національної академії наук України*, 2025, № 2. С. 3–15. DOI: 10.15407/vsn2025.02.003
9. Wheeler, S. The ecological impacts of war. *Envirosustain*. August 1, 2025. URL: <https://www.envirosustain.com/our-stories/the-ecological-impacts-of-war> (дата звернення: 06.11.2025).
10. International Atomic Energy Agency (IAEA). Environmental consequences of the Kakhovka dam destruction. Vienna: IAEA, 2023. 42 p.
11. Білявський Г.О. Екологічна безпека та сталий розвиток. Київ: Наукова думка, 2020. 312 с.
12. Наслідки воєнних дій та вплив на довкілля. *ЕкоЗагроза*. 2025. URL: <https://ecozagroza.gov.ua> (дата звернення 16.11.2025).
13. United Nations Environment Programme (UNEP). Environmental assessment of the Gulf War. Geneva: UNEP, 1993. 99 p.
14. United Nations. General Assembly Resolution 47/37: Protection of the environment in times of armed conflict. New York: UN, 1992.
15. Branch, A., & Minkova, L. (2023). *Ecocide, the Anthropocene, and the International Criminal Court*. Ethics and International Affairs. Cambridge University Press. DOI: 10.1017/S0892679423000059
16. Bassiouni, M.C. (2011). *Crimes Against Humanity: Historical Evolution and Contemporary Application*. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 978-1107001152

Дата першого надходження статті до видання: 28.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026

## ЛАНДШАФТНИЙ ДИЗАЙН І СЕЛЕКЦІЯ РОСЛИН: СИНЕРГІЯ ДЛЯ СТВОРЕННЯ СУЧАСНИХ ЗЕЛЕНИХ ПРОСТОРІВ У САДОВО-ПАРКОВОМУ ГОСПОДАРСТВІ

Шокало Н.С., Нагорна С.В., Гапон С.В., Галицька М.А., Диченко О.Ю.

Полтавський державний аграрний університет

вул. Сковороди, 1/3, 36003, м. Полтава

shns12@ukr.net, svtlana.shershova@pdau.edu.ua, svtlana.hapon@pdau.edu.ua,

maryna.galytska@pdau.edu.ua, oksana.dychenko@pdau.edu.ua

Сучасні тенденції урбанізації супроводжуються екологічними викликами, що зумовлюють необхідність комплексного, міждисциплінарного підходу до формування сталого міського середовища, зокрема через поєднання ландшафтної дизайну та науково обгрунтованої селекції рослин.

У статті досліджено потенціал синергії між декоративно-композиційними рішеннями та біоадаптаційними властивостями флористичних компонентів, що визначають не лише естетичну привабливість міських просторів, а й екологічну стійкість, адаптивність до кліматичних змін і функціональну ефективність зелених зон. Особливу увагу приділено перевагам використання аборигенних видів і селекційно адаптованих рослин, які демонструють високу здатність до екологічної стабілізації урбанізованих ландшафтів, ефективно функціонуючи в умовах кліматичного стресу.

Окремим прикладом успішної реалізації таких підходів є Студентський парк Полтавського державного аграрного університету площею близько 4,5 га, що виконує рекреаційні, науково-освітні та екологічні функції, поєднуючи аборигенні й інтродуковані види з високою декоративністю й адаптивністю. Представлено результати використання технологій GIS-модельовання для просторового аналізу зелених насаджень і прогнозування екосистемних послуг, зокрема зниження теплових островів, регулювання водного балансу та підвищення біорізноманіття. Наведено приклади ефективної інтеграції селекційних і дизайнерських підходів на прикладі Кременецького ботанічного саду, де реалізується інтродукція рідкісних деревних видів; Долгинцівського дендропарку в Кривому Розі, який використовує аборигенні степові рослини для рекультивативної техногенних ділянок; а також Чернівецького ботанічного саду з понад 1300 таксонів, що репрезентують інноваційні підходи до поєднання біорізноманіття й естетики.

Обгрунтовано доцільність розроблення моделей оптимізації ландшафтних композицій із врахуванням кліматичних зон, ґрунтових характеристик, соціокультурного навантаження та екосистемних послуг. Підкреслено актуальність подальших досліджень у напрямі формування інноваційної методології стійкого озеленення міських територій, що передбачає співпрацю між біологами, дизайнерами, урбаністами, геоінформатиками та екологами. Такий підхід дозволяє створювати не лише візуально привабливі, а й функціонально збалансовані зелені простори, що відповідають викликам XXI століття. *Ключові слова:* ландшафтний дизайн, селекція рослин, зелені зони, біорізноманіття, урбанізація, кліматостійкість, GIS-аналіз, садово-паркове господарство.

**The landscape design and plant breeding: synergy for creating modern green spaces in gardening and parking. Shokalo N., Nahorna S., Hapon S., Galytska M., Dychenko O.**

The modern urbanization trends are accompanied by environmental challenges, which necessitate a comprehensive, interdisciplinary approach to the formation of sustainable urban environments, particularly through the integration of landscape design and scientifically grounded plant selection.

This article explores the potential synergy between decorative-compositional solutions and the bioadaptive properties of floristic components, which determine not only the aesthetic appeal of urban spaces but also their ecological resilience, adaptability to climate change, and functional effectiveness. Special attention is given to the advantages of using native species and selectively adapted plants that demonstrate a high capacity for ecological stabilization of urbanized landscapes, functioning effectively under climate stress conditions.

A particular example of successful implementation of such approaches is the Student Park of Poltava State Agrarian University, covering an area of approximately 4.5 hectares. It fulfills recreational, educational, and ecological functions, combining native and introduced species with high decorative and adaptive potential.

The study presents the results of applying GIS-modelling technologies for spatial analysis of green plantings and forecasting ecosystem services, such as reducing urban heat islands, regulating water balance, and increasing biodiversity. Examples of effective integration of breeding and design approaches are provided, including the Kremenets Botanical Garden, where rare tree species are introduced; the Dolhyntsiivskyi Dendropark in Kryvyi Rih, which utilizes native steppe plants for the reclamation of technogenic sites; and the Chernivtsi Botanical Garden, which hosts over 1,300 taxa and represents innovative approaches to combining biodiversity with aesthetics.



The necessity of developing models for optimizing landscape compositions with consideration of climatic zones, soil characteristics, socio-cultural load, and ecosystem services is substantiated. The relevance of further research in the direction of forming an innovative methodology for sustainable urban greening is emphasized, involving cooperation among biologists, designers, urbanists, GIS specialists, and ecologists. Such an approach enables the creation of not only visually attractive but also functionally balanced green spaces that meet the challenges of the 21st century. *Key words*: landscape design, plant selection, green areas, biodiversity, urbanization, climate resistance, GIS analysis, gardening.

**Постановка проблеми.** Інтенсивні процеси урбанізації, кліматичні зміни глобального характеру та необхідність адаптації міського середовища до принципів сталого розвитку зумовлюють зростання ролі садово-паркового господарства й ландшафтного дизайну як важливих компонентів екологічної та просторової політики сучасних міст.

Зелені насадження, сформовані на основі інтегрованого підходу, здатні виконувати широкий спектр функцій: від рекреаційної та естетичної до клімато-регулювальної, санітарно-гігієнічної й біоекологічної. Однак в умовах української практики спостерігається превалювання фрагментарних підходів до формування зеленого каркаса міста. Ландшафтне проектування, у більшості випадків, обмежується декоративно-естетичними критеріями, тоді як селекційні розробки орієнтовані переважно на виведення окремих рослинних форм із покращеними морфологічними або адаптивними характеристиками без належного урахування функціонального контексту ландшафтною композиції.

Така відсутність міждисциплінарної синергії між фахівцями з ландшафтного дизайну та селекціонерами рослин знижує ефективність впроваджених проєктів озеленення, ускладнює їх довготривале утримання, а також обмежує потенціал для створення сталих, біологічно різноманітних і кліматично резилієнтних зелених середовищ. Унаслідок цього спостерігається недостатня адаптація рослин до умов урбоекосистем, зростання експлуатаційних витрат на догляд за насадженнями, а також обмеження екосистемних послуг, які могли б забезпечувати сучасні зелені простори.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У зарубіжних практиках (наприклад, Вислій сад Піта Удоульфа – Wisley Garden, UK) продемонстровано успішну інтеграцію дизайнерської концепції з підбором рослин за їх біологічними властивостями, що дозволило створити стійкі, багатожиттєві композиції з 150 різновидів рослин, що забезпечують сезонну динаміку й мінімальні витрати на обслуговування.

Сучасні теоретичні підходи – від ландшафтною геноміки до байоботаніки – показують потенціал створення адаптивних, саморегульованих зелених структур, які відповідають локальним умовам і сприяють екологічній гармонії. У національному науковому просторі кафедри ландшафтного дизайну та селекції активно працюють над розвитком технологій розмноження декоративних культур, стійкості до кліматичних стресів і ґрунтопокривної композиції [1]. Проте суттєвий розрив між дослідженнями в галузі селекції рослин і практичною реалізацією

дизайнерських концепцій у зеленому просторі залишається, а комплексна модель синергічного підходу – від концепції до вибору адаптивних сортів – практично не впроваджується.

**Мета статті** – здійснити комплексний міждисциплінарний аналіз синергії ландшафтного дизайну та селекції рослин, виявити механізми інтеграції декоративних критеріїв із біологічною адаптивністю, а також розробити практичні рекомендації щодо створення сучасних, ефективних і екологічно стійких зелених просторів у садово-парковому господарстві.

**Виклад основного матеріалу.** У контексті сучасної урбанізації, глобальних змін клімату та запитів на стійке середовище синергія ландшафтного дизайну та селекції рослин стає стратегічно важливою для садово-паркового господарства. Українська практика створення зелених просторів часто характеризується розривом між естетичними засадами дизайну і біологічною доцільністю композицій. Як наслідок, насадження виявляються неадаптованими до умов міста, знижено біорізноманіття, зростають експлуатаційні витрати та знижується ефективність екосистемних функцій (зокрема фільтрації повітря, кліматокорекції, водопоглинання).

Зарубіжні дослідження демонструють переваги комплексного підходу: у вибіркового дослідженні американських міських садів встановлено, що рослини-аборигени та різноманітні рослинні угруповання сприяють 30–120 % підвищенню чисельності бджіл, птахів і комах порівняно з ділянками з мізерною підлісковою рослинністю [2]. Агломераційні зелені площі, що інтегрують водні елементи та щільні насадження дерев, здатні знижувати температуру у міському середовищі на 5 °C у періоді пікових теплових хвиль.

Сучасні моделі ландшафтного проектування ґрунтуються на врахуванні фізіологічних, агрономічних та екологічних параметрів рослин (висота, крона, поширеність, сумісність) у межах містобудівного контексту. Такі підходи дозволяють розробляти галузеві бази даних зі 537 видів рослин, включно з 225 деревами та 195 кущами, які здатні сформувати стійкі ландшафтні композиції.

На практиці, досвід Розарію біля Боско Вертикале (Мілан) демонструє, що озеленені фасади із 94 видами рослин створюють екологічні коридори, що підтримують близько 1 600 бірогенів, зменшують рівень забруднення і функціонують як міське біотичне ядро. Аналогічно, в Сінгапурі й Лондоні ботанічні сади продемонстрували систему охолодження міста на 5 °C у період спекотних хвиль, акцентуючи увагу на ролі структурованих зелених масивів [3].

Аналіз цифрових даних з GIS та моделювання показує: розміщення елементів природи, таких як дерева, кущі й водні об'єкти, із щільною візуальною та біологічною структурою забезпечує зниження теплових балансів на декілька градусів і підвищення біорізноманіття. Більш того, автоматизовані інструменти на основі GIS й ML дозволяють визначати найоптимальнішу композицію рослин за кліматичними зонами, багатофункціональністю та екологічною ефективністю (табл. 1).

Аналіз цифрових даних, зібраних за допомогою GIS-аналітики та методів машинного навчання у табл. 1, підтверджує, що стратегічне розташування дерев, кущів та водних об'єктів у щільних, багат шарових композиціях дозволяє значно знижувати температуру поверхні під час теплових піків – до 2–5 °C. Паралельно, LSTM-моделі, використовувані для оптимізації міських озелень, показують суттєве зменшення рівнів забруднення – зокрема  $PM_{2.5}$  – із точністю  $RMSE \approx 1.75$ ,  $MAE \approx 1.12$  при застосуванні декількох сценаріїв конфігурацій рослин. Крім того, ML-моделі у поєднанні з дистанційним зондуванням дозволяють автоматично підбирати рослинні композиції з урахуванням кліматичних зон, багатофункціональності й екологічної ефективності.

На прикладі Києва результати UAV-теплових зйомок та аналіз поверхневої температури з прив'язкою

до щільності рослинності показали: високий рівень озеленення справді знижує тепловий баланс на 1–2 °C порівняно з забудованими районами. Таким чином, дані демонструють, що густо озеленені урбаністичні площі забезпечують не лише температурну регуляцію, але й підвищення біорізноманіття – до +30–120 % у кількості видів-запилувачів.

Зазначені вище результати свідчать, що інтеграція дерев, кущів і водних об'єктів у щільні композиції, проаналізована цифровими методами, створює ефективний кліматорегуляційний ефект. Завдяки ML- та GIS-інструментам можна автоматично формувати оптимальні рослинні композиції, що поєднують естетику, екологічну ефективність та просторову адаптивність до кліматичних умов.

У рамках сучасної містобудівної та екологічної політики синтез ландшафтного дизайну й селекції рослин набуває особливого значення, адже дозволяє формувати зелені простори, які одночасно є естетично привабливими, екологічно стійкими та функціонально ефективними. В Україні цей підхід уже реалізується у низці садово-паркових об'єктів, хоча досі недостатньо поширений.

Наприклад, ботанічний сад імені О. В. Фоміна в Києві (22,5 га) налічує понад 8 000 видів, зокрема 143 види з Червоної книги України; тут створюються експериментальні ділянки з посухо- і морозо-

Таблиця 1

**Вплив типів рослинних композицій на зниження температури та підвищення біорізноманіття (на основі GIS- та ML-аналізу)**

Метод / Інструмент	Механізм впливу	Ключові результати	Джерело
LSTM (Long Short-Term Memory)	Оптимізація конфігурацій рослинних груп (високий рівень крони, багат шаровий полісадник)	Зниження $PM_{2.5}$ ; мульти-сегментні моделі показують високу ефективність порівняно з однорівневими ( $RMSE \approx 1.75$ , $MAE \approx 1.12$ , $MAPE \approx 6.06$ )	Shan et al. (2024)
Моделі GIS + MCDM (AHP, TOPSIS)	Аналіз багат факторних критеріїв: площа, доступність, клімат, екосистемні функції	Створення карт придатності територій з роздільною здатністю 30 м × 30 м; рекомендації для планування нових зелених зон	Туреччина: Anteneh et al. (2023), Mattijssen et al. (2024)
Deep Learning (Treepedia 2.0)	Використання street-view зображень, семантична сегментація для оцінки охоплення деревом	Підвищення точності оцінок зеленого покриття (IoU з ~44 % до ~60 %, MAE з 10 % до 4.7 %)	Cai et al. (2018)
GIS + UAV/термальна зйомка	Теплові карти, моделювання мікроклімату	Зниження поверхневої температури на 2–5 °C у районах із щільним озелененням; моніторинг $CO_2$ -поглинання різних видів	Kyiv, Holosiivskiy: UAV-камера, дрони
Машинне навчання + GIS	Географічно зважені моделі для аналізу зниження температури (LST)	З'ясовано, що ефективність УНІ-мітгації залежить від кліматичних зон; ML-підходи передбачають температурні зміни	Li et al. (2023), Wu et al. (2024)

Джерело: складено авторами на основі [12]

стійкими сортами, що дозволяє поєднувати наукові селекційні розробки з проєктами ландшафтного дизайну [4]. Іншим прикладом є Сирецький дендропарк (6,5 га, Київ), де наочно демонструють взаємодію історико-культурної спадщини та сучасного зеленого проєктування із врахуванням біологічної адаптації рослин.

Застосування цифрових технологій також підтверджує ефективність такого підходу. Дослідження у Києві показали, що підвищення щільності озеленення на 10 % дає зниження температури пілоосфери на приблизно 1 °C під час теплових хвиль. Аналогічно, у моделях міських ландшафтів на ділянках із газонами й деревами зафіксовано зменшення температури поверхні на 0,5–0,9 °C порівняно з критичними зонами без зеленої рослинності. Такі дані вказують на значний потенціал синергетичного ефекту за правильного властивісного добору рослин (висота, крона, сумісність).

ГІС-моделювання також виявило важливий екосистемний вплив. У дослідженні міста Дніпра за допомогою NDVI встановлено, що 67 % площі є зеленими, що забезпечує 219 м<sup>2</sup> на особу – удвічі більше за мінімальні рекомендації ВООЗ [5, с. 90-93]. На думку Н. Корогоди, подібні підходи вже використовуються й у Києві для оцінки ефективності зелених зон у регулюванні водного балансу [6, с. 59].

Інтеграція ландшафтного дизайну й селекції рослин в Україні уже демонструє свою практичну ефективність. Кременецький ботанічний сад (Тернопільська обл.) розробляє штучні ценози для рідкісних дерев, зокрема *Betula klokovii* та *Fagus sylvatica*, у межах науково обґрунтованих програм 2021–2024 рр. зі збереження дендрофлори [7]. Його колекційний фонд складає понад 318 видів деревних рослин та 96 культиварів, що становить базу для створення стійких і декоративних композицій. Особливо цінним є включення рідкісного *Betula klokovii*, який в природі налічує лише 50–60 особин у двох локалітетах, а в садовому контексті забезпечує маркери біорізноманіття.

У Кривому Розі Долгинцівський дендропарк (27–50 га), заснований ще в 1966–1971 рр., налічує близько 500 видів дерев і кущів з 32 родин, у тому числі рідкісні екзотичні та степові аборигенні таксони [8]. Інтродукція степових видів спрямована на стабілізацію техногенних ґрунтів і підтримку біорізноманіття: зокрема, здатність парку підтримувати понад 70 видів птахів, жаб, ящірок і навіть ссавців свідчить про екологічну цінність такої композиційної моделі [9].

Збір даних GIS та NDVI в межах Дніпра показує, що насадження на основі деревних кластерів і водних елементів покращують температурний режим на 1–2 °C під час теплових хвиль. Також дослідження проявів біорізноманіття, як-от кількість видів запилювачів, демонструє збільшення на 30–120 % у ділянках з аборигенними й декоративними угрупованнями.

У Чернівецькому ботанічному саду налічується понад 755 видів листяних і 437 видів хвойних рослин, включаючи понад 100 культур тюльпанів, 70 видів ірисів і 145 видів кактусів, що свідчить про застосування селекційно-дизайн-орієнтованих композицій, здатних задовольнити рекреаційні та освітні потреби [10].

Студентський парк Полтавського державного аграрного університету площею близько 4,5 га є значущим об'єктом садово-паркового господарства та виконує як рекреаційні, так і науково-освітні функції. Флора парку представлена понад 80 видами деревних і чагарникових рослин, серед яких домінують аборигенні види, зокрема ясен звичайний, клен гостролистий, дуб черешчатий, сосна звичайна, липа серцелиста та береза повисла, що відзначаються високою екологічною пластичністю та здатністю до стабілізації урбанізованого середовища.

Інтродуковані види, такі як гінґо дволопатева та метасеквойя китайська, засвідчують потенціал використання реліктових і рідкісних таксонів у міських ландшафтах з огляду на їхню декоративність і стійкість до несприятливих умов. У композиційній структурі насаджень трапляються також туя західна, катальпа бігніонієвидна, ялівець козацький, глід одноматочковий, бузок звичайний, ялиця корейська та сакура японська, що формують виразний сезонний аспект і підвищують естетичну цінність паркового середовища.

Газонні угруповання представлені багаторічними травами, стійкими до витоптування та посухи, тоді як квітники характеризуються різноманіттям декоративних видів, серед яких півонії, тюльпани, іриси, чорнобривці, лілії та інші багаторічні культури, що забезпечують безперервність декоративності протягом вегетаційного періоду.

Колекційний фонд парку функціонує як навчально-наукова база для студентів агрономічних, екологічних і дизайнерських спеціальностей, надаючи можливості для вивчення морфології, екологічної пластичності та ландшафтно-дизайнерського потенціалу рослинних таксонів. Окрім естетичних функцій, насадження парку виконують важливу екологічну роль, зокрема сприяють зниженню температури повітря в міському середовищі під час теплових хвиль на 1-2 °C, що підтверджено локальними дослідженнями. Таким чином, Студентський парк ПДАУ репрезентує приклад інтеграції наукових підходів до формування біологічно різноманітного, стійкого та функціонально ефективного зеленого простору в умовах урбанізованої території.

У результаті, синергія ландшафтного дизайну та селекції рослин створює можливості для формування зелених просторів, які є естетично привабливими, екологічно стійкими й економічно ефективними. Наступними кроками стає впровадження цифрових платформ для автоматизованого підбору рослин, розробка мультифункціональних стандартів

містобудівництва, а також реалізація пілотних проєктів для формування комплексного зеленого каркасу на національному рівні.

**Висновки.** Отже, ландшафтний дизайн у поєднанні з селекцією рослин постає як ефективна відповідь на екологічні та соціальні виклики урбанізованого середовища. З одного боку, інтеграція аборигенних і адаптованих інтродукованих видів сприяє підвищенню стійкості міських зелених просторів до кліматичних змін, з іншого – дозволяє формувати естетично виразні та функціонально зба-

лансовані ландшафти. Приклад Студентського парку ПДАУ засвідчує можливість реалізації науково обґрунтованих підходів у практиці садово-паркового господарства. Відповіддю на виклики XXI століття має стати розвиток міждисциплінарної методології, що поєднує ботаніку, урбаністику, дизайн і цифрові технології з метою створення біологічно різноманітного та комфортного міського середовища. Таким чином, синергія ландшафтного дизайну й селекції рослин відкриває перспективи для сталого озеленення міст у контексті глобальних трансформацій.

### Література

1. Наукова діяльність : веб-сайт. URL: <https://lg.udau.edu.ua/ua/nauka-ta-innovacii.html> (дата звернення: 15.01.2026)
2. Довідник садівника. «Екологічна гармонія: цифрова синергія в ландшафтному дизайні». Влог. 2025. URL: <https://novasad.com/ekologichna-garmonia-tsfrova-sinerhiia-v-landshaftnomu-dizaini/> (дата звернення: 15.01.2026)
3. Caragh G. Threlfall, Luis Mata, Jessica A. Mackie, Amy K. Hahs, Nigel E. Stork, Nicholas S. G. Williams, Stephen J. Livesley. Increasing biodiversity in urban green spaces through simple vegetation interventions. *Journal of Applied Ecology*. 2017. Vol. 54, № 6. P. 1874-1883. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12876> URL: <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1365-2664.12876> (дата звернення: 14.01.2026)
4. Gayle D. Botanical gardens 'most effective' green space at cooling streets in heatwaves. *The Guardian*. 2024. URL: <https://www.theguardian.com/environment/2024/feb/23/botanical-gardens-most-effective-green-space-at-cooling-streets-in-heatwaves> (дата звернення: 15.01.2026)
5. A.V. Fomin Botanical Garden. *Wikipedia*. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/A.V.\\_Fomin\\_Botanical\\_Garden](https://en.wikipedia.org/wiki/A.V._Fomin_Botanical_Garden) (дата звернення: 14.01.2026)
6. Buchavyi Yu., Lovynska V., Samarska A. A. A GIS Assessment of the Green Space Percentage in a Big Industrial City (Dnipro, Ukraine). *Ekologia (Bratislava)*. 2023. Vol. 42, № 1. P. 89–100. DOI: <https://doi.org/10.2478/eko-2023-0011>. URL: [https://www.researchgate.net/publication/370510327\\_A\\_GIS\\_Assessment\\_of\\_the\\_Green\\_Space\\_Percentage\\_in\\_a\\_Big\\_Industrial\\_City\\_Dnipro\\_Ukraine](https://www.researchgate.net/publication/370510327_A_GIS_Assessment_of_the_Green_Space_Percentage_in_a_Big_Industrial_City_Dnipro_Ukraine) (дата звернення: 16.01.2026)
7. Корогода Н. Оцінка ефективності зелених зон у збереженні біорізноманіття (на прикладі міських ландшафтів Києва). *Landscape Science*. 2024. Том 87, № 5(1). С. 56-66 DOI: <https://doi.org/10.31652/2786-5665-2024-5-56-66> URL: [https://www.researchgate.net/publication/380951401\\_Ocinka\\_efektivnosti\\_zelenih\\_zon\\_u\\_zberezenni\\_bioriznomanitta\\_na\\_prikhladi\\_miskih\\_landsaftiv\\_Kieva](https://www.researchgate.net/publication/380951401_Ocinka_efektivnosti_zelenih_zon_u_zberezenni_bioriznomanitta_na_prikhladi_miskih_landsaftiv_Kieva) (дата звернення: 16.01.2026)
8. Наукові основи збереження та відтворення рідкісних лісових угруповань в квазіприродних екосистемах Кременецького ботанічного саду на 2021–2024 рр. Відділ дендрології : веб-сайт. URL: <https://kremlotsad.in.ua/struktura/viddil-dendrolohii/> (дата звернення: 16.01.2026)
9. Онлайн екскурсія «Природозаповідний фонд Криворіжжя» : веб-сайт. URL: <https://naurok.com.ua/onlayn-ekskursiya-prordozapovidniy-fond-krivorizhzhya-213351.html> (дата звернення: 16.01.2026)
10. Долгинцевский дендропарк. Вікіпедія : веб-сайт. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Долгинцевский\\_дендропарк](https://ru.wikipedia.org/wiki/Долгинцевский_дендропарк) (дата звернення: 16.01.2026)
11. Літвиненко С. Г., Віклюк М. І. Дендрозофити ботанічного саду Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. *Науковий вісник НЛТУ*. 2019. Том 29, № 2. С. 65–72. <https://doi.org/10.15421/40290213> (дата звернення: 14.01.2026)
12. Shuhui Yu, Xin Guan, Junfan Zhu, Zeyu Wang, Youting Jian, Weijia Wang, Ya Yang. Artificial Intelligence and Urban Green Space Facilities Optimization Using the LSTM Model: Evidence from China. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, № 11, P. 8968. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15118968>. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/11/8968> (дата звернення: 16.01.2026)

Дата першого надходження статті до видання: 19.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026

---

# ЗБЕРЕЖЕННЯ БІОЛОГІЧНОГО ТА ЛАНДШАФТНОГО РІЗНОМАНІТТЯ

---

УДК 504

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.1-64.31>

## ВІДНОВЛЕННЯ ДЕГРАДОВАНИХ ЛАНДШАФТІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ БІОТЕХНОЛОГІЙ

Ящук Л.Б.<sup>1</sup>, Бурлака В.С.<sup>1</sup>, Пашенко Г.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Черкаський державний технологічний університет

бульв. Шевченка, 460, 18006, м. Черкаси

<sup>2</sup>Київська академія декоративно-прикладного мистецтва і дизайну імені Михайла Бойчука

вул. Михайла Бойчука, 32, 01014, м. Київ

[l\\_yashchuk@ukr.net](mailto:l_yashchuk@ukr.net), [vladimirburlaka77@gmail.com](mailto:vladimirburlaka77@gmail.com), [anne\\_2010@ukr.net](mailto:anne_2010@ukr.net)

Ґрунтовий покрив – важливий компонент екосистеми, що є сукупністю ареалів ґрунтової біоти, збалансоване функціонування якої лежить в основі самого існування екосистем. Тривала інтенсифікація землекористування сприяла широкому застосуванню хімічних речовин у ґрунті, що призвело до засолення, ерозії та виснаження органічного вмісту. Варто зауважити, що ґрунтові ресурси вичерпні, і у разі сильно виражених деградаційних процесів часто не підлягають регенерації. Процеси природного відродження та самоочищення є складними та довготривалими і не забезпечують повного відновлення деградованих природних ландшафтів, що зумовлює необхідність підтримки та оптимізації стану ґрунтів, а у разі необхідності – їх інтенсивного відновлення. У зазначеному контексті особливої ваги набувають біотехнології, що передбачають використання мікробних консорціумів для ґрунту, фітореMediaцію та біореMediaцію, біологізацію процесів оброблення землі та застосування генетичних методів для підвищення стійкості екосистем. У дослідженні обґрунтовано, що стимулювання природних процесів регенерації деградованих ландшафтів, підкріплена біотехнологічними засобами, дозволяє покращити структуру ґрунту, нейтралізувати забруднення, стимулювати ріст рослинності та підвищувати резильєнтність ландшафтних екосистем до впливу стресорів. Особлива увага в дослідженні приділена біореMediaції. Доведено, що доповнюючи природну мікробіоту в середовищі ґрунту, біостимуляція підвищує її здатність розкласти забруднюючі речовини. Натомість, біоаугментація є більш доцільною до застосування в разі, коли місцеве мікробне середовище не володіє необхідними можливостями для ефективного розкладання поллютантів. У дослідженні запропоновано загальний алгоритм впливу технологічних інновацій на рівень стійкості деградованих ландшафтів. Розглянуто довгострокові наслідки точного землеробства для екосистеми: захист від процесів ерозії та засолення, регенерація деградованих ґрунтів, покращення гідрологічного режиму. *Ключові слова:* методи захисту, технології захисту, хімічні речовини, відновлення, нормування вмісту хімічних речовин, вітрова та водна ерозії ґрунтів, протиерозійні заходи і засоби, мінімізація обробітку ґрунтів.

### Restoration of degraded landscapes using biotechnology. Yashchuk L., Burlaka V., Pashchenko H.

Soil cover is an important component of the ecosystem, and its balance depends on its proper functioning. Natural regeneration and self-cleaning processes do not ensure the restoration of degraded natural landscapes, which necessitates the need to maintain and optimize the state of soils, and if necessary, their intensive restoration. In this context, biotechnology, which involves the use of microbial consortia for soil, phytoremediation and bioremediation, biologization of land cultivation processes and the use of genetic methods to increase the stability of ecosystems, is of particular importance. The study substantiates that stimulating natural processes of regeneration of degraded landscapes, supported by biotechnological means, allows to improve soil structure, neutralize pollution, stimulate vegetation growth and increase the resilience of landscape ecosystems to the effects of stressors. It is proven that by supplementing the natural microbiota in the soil environment, biostimulation increases its ability to decompose pollutants. In contrast, bioaugmentation is more appropriate for use in cases where the local microbial environment does not have the necessary capabilities for effective decomposition of pollutants. The study proposes a general algorithm for the impact of technological innovations on the level of sustainability of degraded landscapes. The long-term consequences of precision agriculture for the ecosystem are considered: protection from erosion and salinization processes, regeneration of degraded soils, improvement of the hydrological regime. *Key words:* protection methods, protection technologies, chemicals, restoration, standardization of chemical content, wind and water erosion of soils, anti-erosion measures and means, minimization of soil cultivation.

**Постановка проблеми.** Забруднення ґрунтів та їх виснаження внаслідок тривалого нераціонального використання призводять до небажаних екологічних наслідків для ландшафтних екосистем. Низький поріг природної стійкості земельних ресурсів до деградації зумовлений вузьким гомеостатичним діа-



© Ящук Л.Б., Бурлака В.С., Пашенко Г.В., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

пазоном, специфічним характером її природно-ресурсного потенціалу та обмеженими адаптивними можливостями. На природне відновлення необхідний значний часовий ресурс, йому характерна неконтрольованість та значна залежність від супутніх факторів навколишнього середовища.

Процес регенерації деградованих ландшафтів включає етапи дослідження ґрунтового покриву та вивчення агрохімічних показників, фіксацію наявності горизонтальної та вертикальної міграції та рівнів забруднення ґрунтово-водних горизонтів забруднювачами, вибір технік та технологій відновлення з врахуванням специфічних індивідуальних властивостей середовища, реалізацію технологічних заходів з біоремедіації, налагодження системи моніторингу загальних параметрів стану ландшафту.

**Актуальність дослідження.** Зважаючи на зростання рівня деградованості сучасних ландшафтів, що підсилюється впливом військових дій в Україні, необхідно розробляти нові методи відновлення земель безпечними методами, серед яких чільне місце відводиться застосуванню біоеннологій, котрі здатні забезпечити швидкий та пролонгований позитивний ефект впливу на ландшафти, сприяють підвищенню загальної стійкості екосистем.

**Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.** Численні сучасні наукові праці та дослідження присвячені вдосконаленню методів раціонального використання в умовах деградації земель. Здебільшого, сучасний глобальний науковий дискурс зосереджений в даній галузі на стратегіях технологічної модернізації господарства та мінімізації обробітку ґрунту, що підвищують економічну ефективність та екологічну безпеку використання ландшафтів. Водночас, питання відновлення деградованих земель залишається невирішеним.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботах сучасних авторів P. Skvortsova та ін. [1], N. Nnaji та ін. [2], M. Usman та ін. [3] наголошується на практичних аспектах органічного виробництва через інноваційні технологічні рішення, які є шадними для ґрунту та доповнюють принципи «зеленої» економіки. Вчені V. Yamini, V. Rajeswari [4], Y. Chernysh та ін. [5] проаналізували деструктивні зміни земельних ресурсів, які важко відновити традиційними методами. Автори переконані, що деградація спричинена тривалим накопиченням токсичних хімічних речовин у ґрунтах внаслідок екстенсивної діяльності.

Продовжуючи, Sh. Chen, M. Zhong [6], P. Yaashikaa, P. Kumar [7], A. Khokhlov та ін. [8] досліджують біотехнології в контексті регулятора загального здоров'я екосистеми. Вчені приділяють особливу увагу потенціалу трансферу технологій як перспективного вектору інноваційної трансформації екологічного управління ландшафтами.

Дослідники D. Rose та ін. [9], J. Clapp [10] обґрунтовують функціональність систем моніторингу, які

вони позиціонують як основу екосистемного підходу до господарської діяльності на деградованих ландшафтах, що забезпечує превентивний захист від негативних наслідків для навколишнього середовища. Водночас, L. Rocchi та ін. [11], D. Hou та ін. [12] у своїх дослідженнях пропонують комплексний підхід до оптимізації стану деградованих земель у рамках програм сталого розвитку та зеленого економічного курсу. Такий підхід включає заходи щодо нейтралізації негативного впливу антропогенних навантажень, максимального усунення забруднення, регенерації природних ресурсів та відновлення природних ландшафтних комплексів шляхом використання сучасних рішень у галузі біотехнологій.

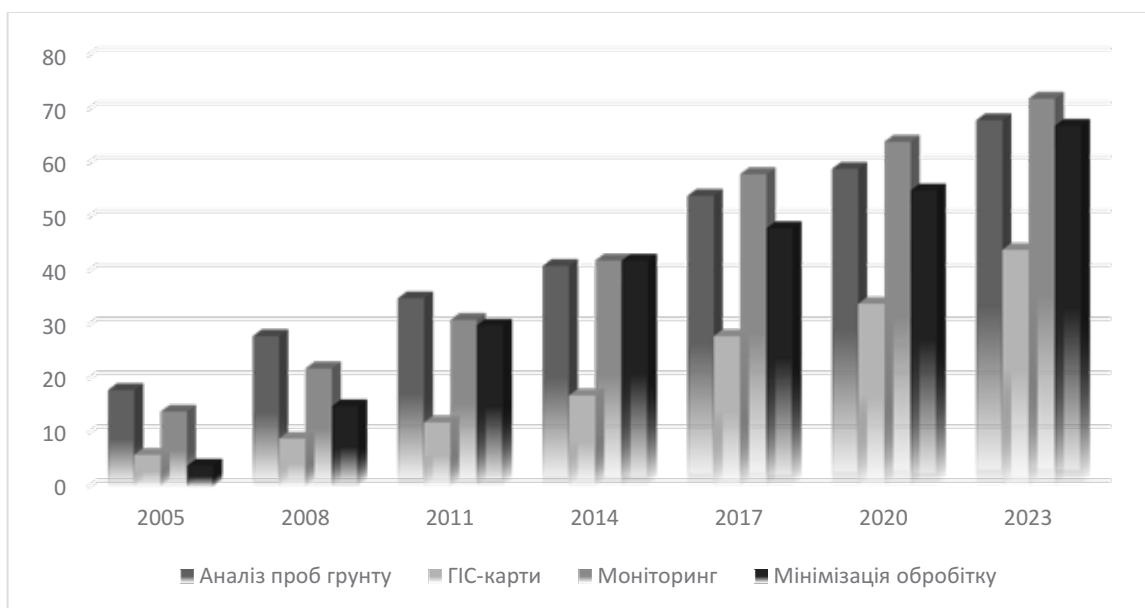
**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** Не нівелюючи значимість висновків вчених, багато питань у галузі вдосконалення методів раціонального використання ландшафтів в умовах деградації земель вимагають деталізації та пошуку оптимальних рішень. Зокрема, процеси інтеграції біотехнологій у системи органічного та точного землеробства вивчені фрагментарно. Метою дослідження є аналіз потенціалу інноваційних біотехнологій для раціонального використання та регенерації деградованих ландшафтів.

**Новизна.** У дослідженні запропоновано поєднання технік та технологій біологічного спрямування: біоремедіації, використання мікробних консорціумів для ґрунту, біологізації процесів оброблення землі та застосування генетичних методів для підвищення стійкості екосистем.

**Методологічне або загальнонаукове значення.** Запропонований підхід може бути успішно використаний для вдосконалення систем органічного землеробства, що передбачає заборону на агресивну агрохімізацію в процесі виробництва продукції, збереження природної мікрофлори ґрунту, мінімізацію технологічного обробітку, захист від водної та вітрової ерозії.

**Виклад основного матеріалу.** Модернізація методів раціонального землекористування в межах деградованих ландшафтів має на увазі, в основному, інтеграцію інноваційних агротехнологій, оптимізацію системи добрив та хімізації з пріоритетністю біологічних способів захисту рослин та органічних добрив. Точне землеробство передбачає нерозривний моніторинг стану ґрунту, що дає можливість стратегічного планування системи оптимізації параметрів деградованих земель, а також впровадження біоенергетичних стратегій їх регенерації [13]. Основою біо-підходу позиціонується переконання, що методи, які є толерантними для природного доквілля, зберігають стан ґрунту в межах екологічних норм.

З метою аналізу ефективності впровадження технології точного землеробства було проаналізовано темпи імплементації її елементів у європейських країнах, що дозволяє прогнозувати позитивну динаміку впливу технології (рис. 1).



**Рис. 1. Темпи імплементації елементів точного землеробства у ЄС, %**

Джерело: узагальнено авторами на основі [14]

Як свідчить європейська практика, превентивний захист ландшафтів від забруднення та деградації має здійснюватися за допомогою:

а) регулярного достовірного та незалежного лабораторного контролю наявності потенційних забруднювачів у ґрунті;

б) організації буферних зон та екологічних майданчиків;

в) впровадження системи моніторингу ерозійних процесів;

г) рекультиватії та регенерації деградованих ґрунтів [2, 15].

Практичний досвід свідчить про значну ефективність біотехнологій для відновлення деградованих ландшафтів. Особливої уваги потребує потенціал біоремедіації, при цьому доповнюючи природну мікробіоту в середовищі, біостимуляція підвищує її здатність розкладати забруднюючі речовини, а біоаугментація є більш доцільною до застосування в разі, коли місцеве мікробне середовище не володіє необхідними можливостями для ефективного розкладання поллютантів [16].

Варто відзначити, що сукупність факторів навколишнього середовища, таких, як температура, солоність, рівень кислотності та вміст кисню, можуть суттєво впливати на проходження процесів біологічної ремедіації. Зокрема, існує зворотній зв'язок між солоністю та розчинністю окремих речовин, так як збільшення концентрації солі провокує їх підвищене поглинання [17]. Воночас біоремедіація передбачає відновлення порушених земель не лише за допомогою асоціацій мікроорганізмів, але й з залученням методів:

– фітоекстракції, що передбачає використання спеціальних рослин для акумуляції важких металів;

– фітоволатілізації – випаровування окремих хімічних елементів через листя рослин;

– фітостимуляції, що являє собою стимулювання розвитку симбіотичних мікроорганізмів, що відіграють важливу роль в процесах очищення;

– фітостабілізації – переведення хімічних з'єднань важких металів у менш активну і рухому форму, що може знизити ризики поширення забруднення;

– фітодеградації, що забезпечує деструкцію органічних складників забруднень симбіотичними мікроорганізмами та рослинами.

Популяризація та активне застосування широких можливостей методу біоремедіації відкриють можливості комплексного вирішення проблеми забруднення ґрунтового покриву [18]. Серед численних переваг ефективного використання біоремедіації як дієвого методу детоксикації та деконтамінації хімічно забруднених ґрунтів, варто виділити екологічну безпечність застосовуваних методів і мінімізацію залишкового впливу на екосистему, мінімальне втручання до хімічного та фізичного складу ґрунтового покриву, високі показники ефективності за низьких концентрацій речовини-забруднювача, відповідність методу засадам сталого управління, виключення використання небезпечних хімічних сполук, можливість повного розщеплення забруднень, значний економічний ефект. Загалом, переваги біологічної ремедіації позиціонують її як оптимальний та цілком реальний до використання підхід для очищення забруднених ландшафтів, що дає змогу отримувати екологічно чисте, ефективне рішення одного з проблемних наслідків деструктивного впливу антропогенної діяльності на ландшафтні екосистеми [3, 15].

Водночас необхідно закцентувати увагу на окремих недоліках методу, що все ж мають місце поруч із численними перевагами. Серед них – можливість акумулятивного ефекту продуктів розпаду та біонакопичення через харчові ланцюги; відсутність ретельних досліджень потенційних токсичності та біодоступності побічних продуктів, що утворюються під час процесів біодеградації; складнощі у застосуванні методу для обробки глибоких шарів ґрунту; залежність результату від кліматичного та сезонного впливів. Враховуючи зазначені недоліки, можна стверджувати про необхідність ретельної оцінки та моніторингу стану екосистем під час реалізації заходів з біоремедіації, що дозволить забезпечити високу ефективність процесу рекультивациі при мінімізації потенційних ризиків для навколишнього середовища [8].

Розвиток екологічної стійкості ландшафтів містить у підґрунті вдосконалення концепції органічного землеробства. Окрім систем точного та ощадливого обробітку площ, мінімізації хімічного впливу та вдосконалення сівозмін, важлива роль відводиться процесам моніторингу та контролю. Необхідно активно залучати можливості моніторингу та геоінформаційних систем для визначення найбільш пошкоджених ділянок, щоб надалі інтегрувати системи біоіндикації на постійній моніторинговій основі. Симбіотичні асоціації з грибним компонентом позиціонуються важливими біомаркерами для практичної та достовірної оцінки якості компонентів навколишнього природного середовища – зокрема, води та ґрунту. Певні методи, такі як сівозмінна та сучасні методи зрошення, можуть сприяти ефективності біоіндикаційних процесів, покращують здоров'я ґрунту, що є вирішальними для розробки стійких та ефективних стратегій захисту ландшафтів [12].

Доцільно також запропонувати використовувати гриби як ефективні інструменти для біомоніторингу та послідуночої мікоремедіації. Так, мікоіндикатори є інноваційним засобом для більш точної та доступної ранньої діагностики токсичності навколишнього середовища. Окрім того, необхідно враховувати у перспективі можливості інтеграції генної інженерії та методів редагування генів. Зокрема, актуальними є створення або модифікація рослин, стійких до засолення, посухи або з підвищеною здатністю до очищення ґрунтів (гіпернакопичувачі).

Використання способів біологічної індикації та ремедіації у комплексному моніторингу ландшафтів сприятиме реалізації екологічнобезпечного

шляху регенерації ґрунтового середовища, забезпеченню екологічної стабільності з одночасною нейтралізацією негативних процесів забруднення. При цьому забезпечується збереження природних біологічних властивостей ґрунту, утворюються оптимальні умови функціонування компонентів системи «ґрунт – ґрунтова біота – рослина» [4]. При цьому потенціал біотестування для визначення параметрів забруднення ґрунтового середовища доцільно використовувати і щодо якості води в контексті розвитку біоіндикаційного моніторингу в природних умовах агроландшафтів України.

Стратегія удосконалення системи моніторингу та регенерації деградованих ландшафтів має поєднувати екологічну безпеку та економічну ефективність. Інноваційні можливості інформаційних технологій, що передбачають залучення потенціалу геоінформаційних технологій, спостережень за допомогою дронів та інших науково-технічних досягнень, спроможні у майбутньому доповнити та розширити можливості біоіндикації та біотестування.

**Головні висновки.** Використання способів біологічної ремедіації сприятиме реалізації екологічнобезпечного шляху регенерації ґрунтового середовища за допомогою використання інноваційних біопрепаратів, що сприятиме забезпеченню екологічної стабільності середовища, з одночасною нейтралізацією негативних процесів забруднення та оптимізацією екологічного стану ґрунту. Такий процес можливий завдяки активізації природного біологічного потенціалу ґрунту та продуктивності рослин. При цьому забезпечується збереження природних біологічних властивостей ґрунту, формуються оптимальні умови для формування мікро- та мікобіоти ґрунту з високим рівнем біологічної активності, в результаті чого утворюються оптимальні умови функціонування компонентів системи «ґрунт – ґрунтова біота – рослина». Зазначені процеси формують передумови для здійснення ефективної біоремедіації деградованих ландшафтів та регенерації їх якості, превентивних заходів щодо біологічної та хімічної деградації ґрунтів.

**Перспективи використання результатів дослідження.** Розширені можливості методу біоремедіації ґрунтового покриву вбачаються оптимальними для активного використання в агроекології, мікробіології ґрунтів, екологічному менеджменті ландшафтів, в ході реалізації екологічного моніторингу техногенно забруднених ландшафтів різного цільового призначення, а також у науково-дослідній практиці.

### Література

1. Skvortsova P., Ablieieva I., Boiko A., Chernysh Y., Batalov Y., Kuzomenska K., Roubik H. Assessment of ecological safety and economic efficiency of biosorption technology for soil protection after hostilities. *Journal of Hazardous Materials Advances*. 2025. Vol. 18. 100677. DOI: 10.1016/j.hazadv.2025.100677
2. Nnaji N., Onyeaka H., Miri T., Ugwa C. Bioaccumulation for heavy metal removal: a review. *SN Applied Sciences*. 2023. Vol. 5, No. 5. DOI: 10.1007/s42452-023-05351-6.

3. Usman M., Jellali S., Anastopoulos I., Charabi Y., Hameed B., Hanna K. Fenton oxidation for soil remediation: A critical review of observations in historically contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*. 2022. Vol. 424. 127670. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.127670.
4. Yamini V., Rajeswari V. D. Metabolic capacity to alter polycyclic aromatic hydrocarbons and its microbe-mediated remediation. *Chemosphere*. 2023. Vol. 329. 138707. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.138707.
5. Chernysh Y., Plyatsuk L., Roubik H., Yakhnenko O., Skvortsova P., Bataltsev Y. Application of Technological Solutions for Bioremediation of Soils Contaminated with Heavy Metals. *Journal of Engineering Sciences*. 2021. Vol. 8, Issue 2. P. H8–H16. DOI: 10.21272/jes.2021.8(2).h2.
6. Chen Sh., Zhong M. Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil. In: Noreña H.A.S. (ed.): *Environmental Chemistry and Recent Pollution Control Approaches*, 2019. DOI: 10.5772/intechopen.90289
7. Yaashikaa P. R., Kumar P. S. Bioremediation of hazardous pollutants from agricultural soils: A sustainable approach for waste management towards urban sustainability. *Environmental Pollution*. 2022. Vol. 312. 120031. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.120031
8. Khokhlov A. V., Khokhlova L. Y., Titarenko M. V. Development of Bio Sorption Composites of a Destructive Type for Purification of Soil Contaminated with Pesticides. *Nauka ta innovacii*. 2020. Vol. 16, No. 3. P. 69–80. DOI: 10.15407/scin16.03.069.
9. Rose D., Wheeler R., Winter M., Lobley M., Chivers C. Agriculture 4.0: Making it work for people, production, and the planet. *Land Use Policy*. 2021. Vol. 100. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104933>
10. Clapp J. Explaining Growing Glyphosate Use: The Political Economy of Herbicide-Dependent Agriculture. *Global Environmental Change*. 2021. Vol. 67. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102239>.
11. Rocchi L., Boggia A., Paolotti L. Sustainable Agricultural Systems: A Bibliometrics Analysis of Ecological Modernization Approach. *Sustainability*. 2020. Vol. 12(22). <https://doi.org/10.3390/su12229635>
12. Hou D., O'Connor D., Igalavithana A.D. Metal contamination and bioremediation of agricultural soils for food safety and sustainability. *Nat Rev Earth Environ*. 2020. Vol. 1. Pp. 366–381. URL: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0061-y>
13. Xie H., Zhang Y., Wu Z. A bibliometric analysis on land degradation: Current status, development, and future directions. *Land*. 2020. Vol. 9(1), 28. <https://doi.org/10.3390/land9010028>
14. The agricultural European Innovation Partnership (EIP-AGRI). <https://ec.europa.eu/eip/agriculture/en/about.html>
15. Mahata S., Sharma V. N. The global problem of land degradation: A review. *Natl. Geogr. J. India*. 2021. Vol. 67. Pp. 216-231. DOI : 10.48008/ngji.1773
16. Hossain A., Krupnik T. J., Timsina J., Mahboob M. G., Chaki A. K., Farooq M., Hasanuzzaman M. Agricultural land degradation: processes and problems undermining future food security. In *Environment, climate, plant and vegetation growth*. Pp. 17-61. Cham: Springer International Publishing, 2020. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-49732-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-49732-3_2)
17. Hermans K., McLeman R. Climate change, drought, land degradation and migration: exploring the linkages. *Current opinion in environmental sustainability*. 2021. Vol. 50. Pp. 236-244. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2021.04.013>
18. Petrukha S., Petrukha N. State regulation of agrarian-construction clusters under conditions of demencia of rural development. *VĚDA A PERSPEKTIVY*. 2021. № 5 (5). P. 42–56. DOI: [https://doi.org/10.52058/2695-1592-2021-5\(5\)-42-56](https://doi.org/10.52058/2695-1592-2021-5(5)-42-56) URL: <http://perspectives.pp.ua/index.php/vp/article/view/568/572>

Дата першого надходження статті до видання: 05.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026

---

# ЗАГАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

---

УДК 628.1:504.064:351.86

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.1-64.32>

## СИСТЕМНІ ВИКЛИКИ СТАЛОМУ ВОДОПОСТАЧАННЮ МІСТ УКРАЇНИ ТА СТРАТЕГІЯ БЕЗПЕКИ НАСЕЛЕННЯ

Яковлев В.В., Дмитренко Т.В.

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова  
вул. Черноглазівська, 17, 61002, м. Харків  
[yakovlev030157@gmail.com](mailto:yakovlev030157@gmail.com), [tetyana.dmytrenko@kname.edu.ua](mailto:tetyana.dmytrenko@kname.edu.ua)

Стаття присвячена дослідженню стійкості систем водопостачання великих міст України, зокрема Харкова, в умовах збройної агресії та техногенних й природних викликів. На підставі аналізу оперативних даних міських підприємств водопостачання, результатів лабораторних досліджень якості питної води, викладених у звітах відповідних служб і лабораторій водоканалів, результатів гідрогеологічних досліджень характеристик водоносних горизонтів Харківського регіону для оцінки потенціалу артезіанського водопостачання, а також законодавчої та нормативної бази щодо забезпечення населення питною водою, у статті розглянуто та проаналізовано можливі сценарії порушення роботи міського водопроводу, що можуть призвести до критичних гуманітарних ситуацій в сучасних містах України. За результатами дослідження встановлено основні причини й «точки» вразливості системи міського водопроводу. Знання певних недоліків міських водопровідних систем дозволило визначити основні напрями вдосконалення систем водопостачання міського населення. Доведено необхідність переходу від надмірно централізованої моделі до комбінованої системи, що передбачає використання захищених артезіанських вод безпосередньо в місцях щільного проживання населення. Запропоновані шляхи підвищення надійності системи питного водопостачання в містах. Результати дослідження можуть бути використані органами виконавчої влади та територіальними громадами для вирішення питань, пов'язаних з організацією водопостачання в населених пунктах України, зокрема під час дії воєнного стану, а також для оновлення планів цивільного захисту міст та розробки водоохоронних рішень. Досвід міста Харкова, систематизований у даному дослідженні, може бути використаний як модель для інших міст України. *Ключові слова:* питне водопостачання, надійність водопровідних систем, воєнний стан, кризові умови, альтернативні джерела, бювети, водна безпека.

**Systemic challenges to sustainable water supply in Ukrainian cities and a strategy for population safety. Yakovlev V., Dmytrenko T.**

This article examines the sustainability of water supply systems in large Ukrainian cities, particularly Kharkiv, in the face of military aggression and man-made and natural challenges. Based on an analysis of operational data from urban water supply companies, the results of laboratory tests on drinking water quality presented in reports from relevant services and water utility laboratories, the results of hydrogeological surveys of aquifer characteristics in the Kharkiv region to assess the potential of artesian water supply, and the legislative and regulatory framework for providing the population, the study identifies potential disruptions to urban water supply systems that could lead to critical humanitarian situations in Ukrainian cities. According to the results of the study the main causes and vulnerabilities of the urban water supply system are identified. Knowledge of specific deficiencies in urban water supply systems has enabled the identification of key areas for improvement. The need for a transition from an overly centralised model to a combined system that provides for the use of protected artesian water directly in densely populated areas is demonstrated. Ways to improve the reliability of urban drinking water supply systems are proposed. The study results can be used by executive authorities and amalgamated territorial communities to address water supply issues in populated areas of Ukraine, particularly during martial law, as well as to update civil defence plans for cities and develop water conservation solutions. The experience of Kharkiv, systematised in this study, can be used as a model for other cities in Ukraine. *Key words:* drinking water supply, reliability of water supply systems, martial law, crisis conditions, alternative sources, pump rooms, water security.

**Постановка проблеми.** Однією з найважливіших проблем життєзабезпечення будь-якого міста України є стале функціонування систем водопостачання. В сучасних містах системи водопостачання мають високий ступінь концентрації та централізації, тому, зокрема в умовах воєнного стану, вони стають об'єктами критичної вразливості, що загрожує

стабільності життя всього міста. Обмежені фінансові ресурси та системна технологічна деградація об'єктів комунальної інфраструктури призводять до втрати їхньої стійкості, що унеможливує ефективне функціонування систем у кризових умовах. Наразі вдосконалення системи питного водопостачання на урбанізованих територіях фактично вирішується



© Яковлев В.В., Дмитренко Т.В., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

тільки на основі товарно-грошових відносин між постачальником і споживачем з використанням шаблонів, вже напрацьованих в розвинених країнах за напрямками бутілювання води, продажу її в тару населення в торгових точках та доставляння до місць щільного проживання населення. В сучасних реаліях збройної агресії проблема водопостачання міст України є не лише проблемою комунального сектору, а й викликом національній безпеці держави. Вкрай актуальною ця проблема постає для прифронтового Харкова – другого за величиною міста України. Харківщина належить до найбільш вразливих регіонів через інтенсивність воєнних дій та пошкодження водопровідних систем.

**Актуальність дослідження.** Одним із пріоритетних напрямів державної програми, спрямованої на вирішення проблеми якісного питного водопостачання, є розробка стратегії та визначення можливих шляхів її реалізації, що має включати розгляд реальних і потенційних загроз для стабільного функціонування систем водопостачання міст.

На цій основі стає можливим обґрунтування відповідних заходів щодо захисту діючих систем водопостачання, їх удосконалення й адаптації до сучасних вимог, а також розробка дієвих механізмів кризового реагування для гарантування безпеки населення в умовах надзвичайних ситуацій.

**Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.** Тема роботи відповідає основним принципам і напрямкам державної політики щодо гарантування безпечних умов життєдіяльності громадян, а також охорони та раціонального використання водних ресурсів України, зокрема, Водному Кодексу України [1], Концепції Загальнодержавної цільової соціальної програми «Питна вода України» на 2022–2026 роки [2], Концепції Державної цільової соціальної програми покращення питного водопостачання України на період до 2035 року [3], Закону України «Про питну воду та питне водопостачання» [4], Водній стратегії України на період до 2050 року [5], Наказу Міністерства з питань житлово-комунального господарства України «Про затвердження Правил користування системами централізованого комунального водопостачання та водовідведення в населених пунктах України» [6], Закону України «Про національну безпеку України» [7] та іншим нормативно-правовим актам.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Наукові праці, опубліковані до повномасштабної війни, спричиненої збройною агресією проти України, зосереджувалися переважно на вирішенні питань енергоефективності систем водопостачання та покращення якості води. Аналіз останніх досліджень та публікацій за період 2022–2025 рр. [8–12] свідчить про докорінну зміну концепції міського водопостачання в Україні – наразі ключове місце посідає проблема стійкості функціонування систем

водопостачання, особливо в умовах воєнного стану, тому питання дослідження різновидів загроз для функціонування систем водопостачання міст потребує більш детального вивчення.

Мета роботи полягає у комплексному аналізі можливих сценаріїв дестабілізації функціонування міських систем водопостачання внаслідок природно-техногенних і воєнних загроз, та обґрунтуванні стратегічних напрямів захисту систем водопостачання для підвищення стійкості систем життєзабезпечення та мінімізації ризиків для здоров'я населення.

**Матеріали та методика дослідження.** Для проведення дослідження було використано та проаналізовано сукупність оперативних даних міських водоканалів (зокрема КП «Харківводоканал»), результати лабораторних досліджень якості питної води, викладених у звітах відповідних служб і лабораторій водоканалів, дані про запаси надійно захищених прісних підземних вод Харківського регіону для оцінки потенціалу артезіанського водопостачання, проведено аналіз законодавчої та нормативної бази щодо забезпечення населення питною водою.

Для комплексного вивчення загроз та обґрунтування відповідних захисних заходів було застосовано методи системного аналізу, що дозволило розглянути можливі сценарії критичного порушення роботи міського водопроводу та визначити загрози для його стабільного функціонування.

**Викладення основного матеріалу.** Розглянемо можливі сценарії потенційних порушень у роботі міського водопроводу.

*Воєнний сценарій.* Уже в перші дні повномасштабної військової агресії проти України у лютому 2022 року зазнав пошкоджень водогін, що забезпечує подачу води з р. Сіверський Донець до міста Харкова. У ситуації, що склалася, фахівці з водопостачання та науковці були змушені розробляти заходи аварійного водопостачання на основі використання підземних вод. Це було зроблено поспіхом, без належного прорахування наявних запасів, оцінки якості води та захищеності джерел, і головне – без урахування спеціально розроблених для таких критичних ситуацій пропозицій, викладених автором у кандидатській та докторській дисертаціях [13,14].

Штучна повінь у місті Херсон у 2023 р., що стала наслідком ворожого підриву дамби у Новій Каховці, призвела до затоплення колодязів і свердловин, які використовувалися як джерела децентралізованого водопостачання. Це спричинило загрозу епідемій для значної частини населення. Водночас катастрофічне зниження рівня води у Каховському водосховищі зумовило порушення водопостачання у десятках прибережних і віддалених населених пунктів.

Досвід збройних конфліктів на межі ХХ–ХХІ століть в Югославії, Сирії, Лівії, Іраку, Чечні, а також сучасні реалії повномасштабної війни в Україні продемонстрували критичну вразливість міських систем

життєзабезпечення. Внаслідок авіаційних і ракетних ударів у містах відбувалося повне припинення подачі води через відключення енергопостачання, пошкодження магістральних водопроводів, руйнування насосних станцій і водопровідних мереж, забруднення річок і водосховищ внаслідок руйнувань на промислових об'єктах та очисних спорудах.

*Пандемічний сценарій.* Ряд інфекційних збудників (паратиф, мікрококи, ентеровіруси, цисти найпростіших тощо) характеризуються специфічною стійкістю до дії хлору. Окремі типи умовно-патогенних і патогенних мікроорганізмів, що виявляють значну толерантність до дії хлору, є стабільними забруднювачами міських систем водопостачання. В умовах дефіциту фінансових ресурсів на знезараження води не можна виключати розвиток бактеріального забруднення питної води, стійкого до обробки недостатніми дозами активного хлору. Прикладом може слугувати масове отруєння людей у 2018 р. на окупованій території в місті Макіївка (Донецька область), коли протягом кількох днів було госпіталізовано близько 120 осіб. Причиною стало використання перманганату калію для знезараження води замість хлорування через дефіцит реагентів та неналежний контроль якості води. В червні 2016 р. у місті Ізмаїл (Одеська область) через сильні зливи відбулося підтоплення місцевих кладовищ, туалетів та сміттєзвалищ, в результаті чого збудники (ротавірус, норовірус та кишкова паличка) потрапили у підземні водозабори, а через пошкоджені мережі – у водопровід. У результаті за медичною допомогою звернулося понад 760 осіб, з яких понад 400 осіб – діти.

*Диверсійний сценарій.* Найбільш вразливими до терористичних актів ланками наявної системи водопостачання, що базується на поверхневих джерелах, є, по-перше, самі водосховища, і, по-друге, водопроводи, що транспортують воду в міста. Протяжність берегових ліній водосховищ, їхніх приток та ліній водопроводів зазвичай становить десятки, а іноді й сотні кілометрів. Ефективна охорона таких акваторій та протяжних берегів і магістральних водоводів є надзвичайно складною. Логічно, що дієвим захистом від диверсій є використання захищених підземних вод, децентралізація системи питного водопостачання та відокремлення систем суто питного водопостачання від технічного і, навіть, господарсько-побутового.

*«Чорнобильський» сценарій* передбачає тотальне забруднення поверхневих вод. Катастрофа на Чорнобильській АЕС у квітні 1986 р., як непередбачена подія, продемонструвала неспроможність тогочасних уявлень про надійність таких об'єктів. Висока концентрація потужностей у хімічній промисловості та ядерній енергетиці створює постійний потенціал техногенного забруднення навколишнього середовища. У разі аварійних і катастрофічних викидів в атмосферу або скидів токсичних речо-

вин, річкові водосховища, що є джерелами питного водопостачання, стають об'єктами першочергового забруднення через їхню незахищеність від антропогенного впливу.

Відсутність захищених систем водопостачання у випадках надзвичайних ситуацій, подібних до Чорнобильської катастрофи, коли в навколишнє середовище і поверхневі води буде скинуто велику кількість забруднювальних речовин, загрожує непередбачуваними наслідками, особливо для населення міст. Необхідно підкреслити, що загроза аварій і катастроф за «Чорнобильським» сценарієм із часом не знижується, а зростає разом зі збільшенням потужностей об'єктів. При цьому спостерігається зворотна залежність між ступенем загрози та обсягами фінансування заходів із підтримання безпеки міської інфраструктури.

*«Диканівський» сценарій* – вимушене відключення водопостачання. Протягом липня 1995 р. водопровід міста Харкова був відключений через масштабну аварію в системі водовідведення та неможливість приймання до неї комунальних і промислових стоків з усього міста. Такий варіант розвитку подій також не передбачався, про що свідчить факт вимушеного скидання неочищених стоків в цей період безпосередньо в річку міста.

Централізована каналізаційна система Харкова являє собою споруду з високим ступенем концентрації та централізації. Всі стоки перед очисними спорудами проходять через спеціальну насосну станцію, де на момент аварії не було забезпечено достатньої потужності насосного обладнання та його аварійного дублювання. У цих умовах кількості води від надзвичайно сильної зливи, що потрапила в міську каналізаційну мережу, виявилось достатньо для переповнення та відмови всієї системи водовідведення міста, зумовивши тривале відключення водопроводу. Як показала практика останніх десятиліть, подібні, але менші за масштабами, аварії (або їх загрози) відбувалися в Маріуполі, Дніпропетровську, Ізюмі та інших містах. Одна з таких аварій сталася в лютому 1999 р. у місті Первомайськ (Луганська область), повністю повторивши події Диканівської аварії: через відмову робочого насоса і неготовності резервного і перекачувальних насосів каналізаційними стоками була затоплена насосна станція. В результаті цього водопостачання міста було відключено на декілька днів. У січні 2019 р. у місті Бердянськ стався масштабний обвал магістрального каналізаційного колектора одночасно в кількох місцях, в результаті чого понад тиждень місто перебувало в стані надзвичайної ситуації. Понад 50 тисячам мешканців було відключено водопостачання з метою проведення ремонту та запобігання затопленню нижніх районів міста нечистотами. «Диканівський» варіант виведення водопроводу з робочого стану є наслідком надмірного укрупнення системи життєзабезпечення, коли один збій в цій системі загрожує катастрофіч-

ними наслідками для великої кількості споживачів. З часом імовірність такої події зростає і, в першу чергу, вона загрожує великим містам. Недостатня увага до забезпечення стійкості систем каналізації є найвагомим фактором можливого відключення водопроводу.

*Сценарій «ядерної зими».* Наслідки широкомасштабного ядерного конфлікту в будь-якій частині Землі, розглянуті вченими ще в 80-х роках минулого століття [15,16], передбачають радіоактивне забруднення та замерзання поверхневих джерел прісної води. Основним альтернативним джерелом води в таких умовах можуть бути захищені підземні води.

*Катастрофічні природні явища.* Землетруси, повені та інші стихійні лиха можуть призвести до ситуацій, подібних до «воєнного» сценарію, коли можуть бути зруйновані або затоплені водопровідні споруди, порушені лінії водопровідної мережі, стають непридатними для використання або виснажуються поверхневі джерела води.

На основі вищезазначеного можна визначити основні причини та «точки» вразливості системи міського водопроводу:

1. Незахищені поверхневі джерела водопостачання є критично вразливими до природних катастроф, техногенних аварій та диверсій, що може призвести до масштабного забруднення водопровідної води.

2. Висока вразливість протяжних магістральних водоводів пов'язана з ризиками їх механічного руйнування, а також хімічного і бактеріального забруднення води.

3. Високий ступінь централізації систем водопроводів віддаляє і відчужує населення міст від первинних джерел питної води та підвищує імовірність масштабних перебоїв у водопостачанні.

Наведений аналіз системних недоліків міських водопровідних систем дозволяє визначити основні напрями вдосконалення систем водозабезпечення урбанізованих територій.

Модернізація систем моніторингу якості води у водосховищах і водоводах має базуватися на принципах високої надійності та превентивності. З огляду на технічну складність оперативного моніторингу за всіма нормативно встановленими й можливими параметрами якості води, одним з найважливіших напрямів науково-практичних розробок і модернізації систем контролю має бути застосування методів біотестування з мінімізацією часу проведення аналізу, що дозволяє забезпечити оперативне виявлення токсикологічних загроз.

Для підвищення стійкості системи міського водопостачання мають бути децентралізовані за аналогією з принципами побудови сучасних систем водовідведення.

Для подолання відчуження споживачів від джерела води та забезпечення альтернативним і резервним джерелом актуальним є впровадження системи

локального водозабезпечення. У районах із відповідними гідрогеологічними умовами (наявність захищених прісних підземних вод), у місцях щільного проживання населення доцільно облаштовувати бювети на базі спеціально пробурених і облаштованих артезіанських свердловин, оснащених системами локальної водопідготовки та автономного енергозабезпечення [17,18]. У мирний час такі бювети мають функціонувати на засадах самоокупності (включаючи окупність капітальних коштів, вкладених у будівництво), а в умовах надзвичайних ситуацій, зокрема під час дії воєнного стану, розбір води має здійснюватися на безоплатній основі у спеціально обладнаних і захищених від руйнування підземних приміщеннях. Можливими альтернативними джерелами водопостачання також можуть бути розрізнені колодязі, джерела та свердловини за умови відповідності якості води нормативним вимогам. Зважаючи на повсюдне антропогенне забруднення води колодязів і джерел в умовах великого сучасного міста, в заходах з цивільного захисту ці водопункти доцільно розглядати як джерело технічної води (для пожежогасіння, дезактивації, заправки техніки тощо). Водночас для задоволення питних потреб перевага має надаватися добре захищеним джерелам води – артезіанським водам, навіть якщо вони некондиційні щодо нормативів для питних вод за окремими показниками. Для створення резерву води, необхідного для швидкого розбору автоцистернами, біля джерел доцільно передбачити будівництво проточних залізобетонних резервуарів води з обладнаними під'їзними шляхами для безперешкодного доступу автомашин.

За умов відсутності або дефіциту локальних свердловин або інших джерел кондиційної води на місцях необхідно передбачати створення спеціальних, наближених до населення, пунктів стратегічного резерву бутильованої питної води.

Високий рівень вразливості до згаданих загроз підтверджує система водопостачання міста Харкова, яке здебільшого базується на водах р. Сіверський Донець та перебуває під постійним тиском транскордонного забруднення. Також частина питної води надходить до міста з р. Дніпро через систему каналу Дніпро-Донбас у Краснопавлівське водосховище. Потенційно небезпечні об'єкти в басейні цієї річки утворюють складну мережу джерел ризику.

На сьогодні в місті Харкові вже сформована розгалужена мережа альтернативного водозабезпечення населення. Вона включає систему доставляння води автоцистернами з продажем води в тару населення та мережу платних пунктів розливу (зокрема, кіосків мереж «Галс» та «Кулінічі»). Водночас досвід повномасштабної збройної агресії довів необхідність переходу до більш стійкої моделі. Наразі в Харкові функціонують десятки бюветів із безоплатним наданням питної води на базі очищеної води з централізованого водопроводу, яка попередньо проходить бага-

торівневу сучасну систему очищення та мінералізується. Також для частини бюветів використовується підземна вода зі свердловин. Такий перехід до міської мережі альтернативного безоплатного водозабезпечення є важливим кроком до посилення стійкості міста.

Наукове обґрунтування створення мережі бюветів, що базуються на використанні захищених підземних вод, було детально розроблено в дисертації автора [13], де вперше запропоновано модель децентралізованого питного водопостачання Харкова, зокрема, для умов надзвичайних ситуацій.

Так, місто є найбільш репрезентативним для міст України, яке перейшло від повної централізації до створення ефективної розосередженої мережі водопостачання. Децентралізація через облаштовані бювети є надійним заходом запобігання гуманітарної катастрофи у великому місті завдяки постійному доступу населення до питної води в умовах сучасних викликів.

#### Головні висновки.

1. Зростання міст та укрупнення міських водопровідних систем в сучасних техногенних умовах призводять до підвищення вразливості цих систем і відчуження споживачів від джерел питної води. Сучасна модель водопостачання великих міст характеризується високою концентрацією та централізацією, що в умовах воєнного стану критично підвищує її вразливість.

2. Систематизація сценаріїв дестабілізації міського водопроводу дала підґрунтя для визначення напрямів реформування системи водопостачання міст в кризових умовах. Основними напрямками є децентралізація джерел і систем водопостачання, обов'язкове залучення захищених джерел води та створення альтернативних окремих систем суто питного водопостачання.

3. З метою посилення функціональної стійкості систем водопостачання міст необхідно удосконалити стратегію децентралізації, що передбачає створення локальних бюветних комплексів у місцях щільного проживання населення, забезпечення цих пунктів системами автономного енергозабезпечення та доочищення води, облаштування розрізаних джерел і колодязів як джерел технічного водопостачання. Такі пункти мають бути самоопитними у мирний час та забезпечувати гарантований безоплатний доступ населення до води в кризових умовах.

4. Потребує вдосконалення система контролю якості води у поверхневих водних об'єктах, що використовуються як джерела водопостачання. Загальноприйняті методи контролю якості води мають бути достатньо випереджальними та доповненими методами біотестування, що дозволить оперативно виявляти токсикологічні загрози.

5. Досвід міста Харкова у створенні розгалуженої мережі альтернативного водозабезпечення може слугувати моделлю для інших міст країни та стати базою для удосконалення нормативів безпеки водопостачання у прифронтових і вразливих регіонах України.

**Перспективи використання результатів досліджень.** Результати дослідження можуть бути використані органами виконавчої влади та територіальними громадами для вирішення питань, пов'язаних з організацією водопостачання в населених пунктах України, зокрема під час дії воєнного стану, а також для оновлення планів цивільного захисту міст та розробки водоохоронних рішень. Автори сподіваються, що викладені у статті підходи сприятимуть переходу від вразливої централізованої водопровідної системи міст до гнучкої децентралізованої системи, здатної забезпечити мінімальні потреби населення у воді навіть в умовах повного блекауту.

#### Література

1. Водний кодекс України : Закон України від 06.06.1995 № 213/95-ВР. *Відомості Верховної Ради України*. 1995. № 24. Ст. 189. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-вр> (дата звернення: 19.01.2026).
2. Про схвалення Концепції Загальнодержавної цільової програми «Питна вода України» на 2022–2026 роки: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 28.04.2021 р. № 388-р. *Офіційний вісник України*. 2021. № 37. Ст. 2250. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/388-2021-р> (дата звернення: 19.01.2026).
3. Про схвалення Концепції Державної цільової соціальної програми покращення питного водопостачання України на період до 2035 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 19.11.2025 р. № 1271-р. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-s-pytnoho-vodopostachannia-ukrainy-na-period-do-2035-roku-i-1271> (дата звернення: 19.01.2026).
4. Про питну воду та питне водопостачання : Закон України від 10.01.2002 № 2918-III. *Відомості Верховної Ради України*. 2002. № 16. Ст. 112. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2918-14> (дата звернення: 20.01.2026).
5. Водна стратегія України на період до 2050 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 09.12.2022 р. № 1134-р. *Урядовий кур'єр*. 2022. № 267. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1134-2022-р> (дата звернення: 19.01.2026).
6. Про затвердження Правил користування системами централізованого комунального водопостачання та водовідведення в населених пунктах України : Наказ Міністерства з питань житлово-комунального господарства України від 27.06.2008. № 190. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0936-08> (дата звернення: 20.01.2026).
7. Про національну безпеку України : Закон України від 21.06.2018 № 2469-VIII. *Відомості Верховної Ради України*. 2018. № 31. Ст. 241. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2469-19> (дата звернення: 19.01.2026).
8. Shumilova O., Tockner K., Sukhodolov A. et al. Impact of the Russia–Ukraine armed conflict on water resources and water infrastructure. *Nature Sustainability*. 2023. Vol. 6. P. 578–586. URL: <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01068-x>

9. Лотоцька-Дудик У. Б., Лабойко В. В. Якість питної води та стан водозабезпечення населення України в умовах воєнного стану. *Актуальні проблеми профілактичної медицини*. 2022. № 24. С. 5–12. URL: <https://journals.meduni.lviv.ua/index.php/appm/article/view/2/1>
10. Шевченко О. Л., Кондратюк Є. І., Чарний Д. В. Автономні системи водопостачання підземними водами – необхідний запобіжник гуманітарних катастроф в умовах воєнної агресії. *Геологічний журнал*. 2022. № 3. С. 3–17. URL: <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2022.3.255733>
11. Потапенко С. П., Кравченко О. В. Основні проблеми функціонування існуючих систем водопостачання та водовідведення в Україні. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки*. 2024. № 46. С. 35–42. URL: <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2024.46.35-42>
12. Кравченко О. В., Хоружий В. П., Кانیболоцький В. Г. Особливості експлуатації систем питного водопостачання в умовах воєнного часу. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки*. 2022. Вип. 38. С. 18–37. URL: <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2022.38.18-37>
13. Яковлев В. В. Питне водозабезпечення міст на підставі окремого використання підземних вод (на прикладі м. Харкова): дис. ... канд. техн. наук : 05.23.04 / Харків. держ. акад. міського госп-ва. Харків, 1999. 195 с.
14. Яковлев В. В. Перспективні джерела природних вод для питного водопостачання України, їх охорона і раціональне використання: дис. ... д-ра геол. наук : 21.06.01. / Ін-т проблем природокористування та екології НАН України. Харків, 2017. 357 с.
15. Ehrlich P. R., et al. Long-Term Biological Consequences of Nuclear War. *Science*. 1983. Vol. 222, Issue 4630. P. 1293–1300. URL: <https://doi.org/10.1126/science.6658451>
16. Turco R. P., Toon O. V., Ackerman T. P., Pollack J. B., Sagan C. (1983). Nuclear Winter: Global Consequences of Multiple Nuclear Explosions. *Science*. 1983. Vol. 222, Issue 4630. P. 1283–1292. URL: <https://doi.org/10.1126/science.222.4630.1283>
17. Яковлев В. В., Дмитренко Т.В. Важливий акцент проєкту автономних бюветів питного водопостачання в особливий період у м. Харків. *Чиста вода. Фундаментальні, прикладні та промислові аспекти* : матеріали VIII Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Київ, 9-10 листоп. 2023 р.). Київ, 2023. С. 165–166. URL: <http://purewater.net.ua/wp-content/uploads/2023/11/Proceedings-of-Pure-water-20231.pdf>
18. Яковлев В.В., Дмитренко Т.В., Тягно Ю.В. Резервна система питного водопостачання Харкова. *Екологічно сталий розвиток урбосистем: виклики та рішення в контексті євроінтеграції України* : матеріали Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. (м. Харків, 5–6 листоп. 2024 р.). Харків, 2024. С. 54–56. URL: [https://ecology.kname.edu.ua/images/Materialy\\_conferenciy/Materiali\\_2024\\_OSTATOCNIJ.pdf](https://ecology.kname.edu.ua/images/Materialy_conferenciy/Materiali_2024_OSTATOCNIJ.pdf)

Дата першого надходження статті до видання: 29.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026

---

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

---

**Алексєєв Олексій Олександрович (Вінниця)** – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри екології та охорони навколишнього середовища, Вінницький національний аграрний університет, [orcid.org/0000-0001-5807-4932](https://orcid.org/0000-0001-5807-4932);

**Андрейчук Юрій Михайлович (Львів)** – кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри конструктивної географії і картографії, Львівський національний університет імені Івана Франка, [orcid.org/0000-0002-4940-4319](https://orcid.org/0000-0002-4940-4319);

**Барабаш Юрій Володимирович (Кременець)** – студент, Кременецька обласна гуманітарно-педагогічна академія імені Тараса Шевченка, [orcid.org/0000-0022-2708-4687](https://orcid.org/0000-0022-2708-4687);

**Бахмат Олег Миколайович (Кам'янець-Подільський)** – доктор сільськогосподарських наук, професор кафедри екології і загальнобіологічних дисциплін, Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», [orcid.org/0000-0002-8015-1567](https://orcid.org/0000-0002-8015-1567);

**Божко Тетяна Василівна (Харків)** – начальник, Регіональний офіс водних ресурсів у Харківській області, [orcid.org/0000-0002-9097-8832](https://orcid.org/0000-0002-9097-8832);

**Бондар Олександр Іванович (Київ)** – доктор біологічних наук, професор, академік Національної академії аграрних наук України, в.о. директора, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», [orcid.org/0000-0002-4488-2282](https://orcid.org/0000-0002-4488-2282);

**Бурлака Володимир Сергійович (Черкаси)** – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри лісового господарства та раціонального природокористування, Черкаський державний технологічний університет, [orcid.org/0009-0009-5725-7070](https://orcid.org/0009-0009-5725-7070);

**Ваньо Назар Олегович (Львів)** – аспірант кафедри конструктивної географії і картографії, інженер навчальної лабораторії геоінформаційного моделювання і картографування, Львівський національний університет імені Івана Франка, [orcid.org/0009-0004-4428-8525](https://orcid.org/0009-0004-4428-8525);

**Вискушенко Дмитро Андрійович (Житомир)** – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри екології, Поліський національний університет, [orcid.org/0000-0002-2747-9117](https://orcid.org/0000-0002-2747-9117);

**Войтенко Юлія Володимирівна (Дніпро)** – кандидатка технічних наук, доцентка кафедри безпеки життєдіяльності, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, [orcid.org/0000-0003-0819-3794](https://orcid.org/0000-0003-0819-3794);

**Войтків Петро Степанович (Львів)** – кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри конструктивної географії і картографії, Львівський національний університет імені Івана Франка, [orcid.org/0000-0003-4733-9880](https://orcid.org/0000-0003-4733-9880);

**Волошин В'ячеслав Степанович (Дніпро)** – доктор технічних наук, професор, професор по кафедрі промислової теплоенергетики, Приазовський державний технічний університет, [orcid.org/0009-0005-6809-6779](https://orcid.org/0009-0005-6809-6779);

**Галицька Марина Анатоліївна (Полтава)** – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри екології, збалансованого природокористування та захисту довкілля, Полтавський державний аграрний університет, [orcid.org/0000-0003-2579-0515](https://orcid.org/0000-0003-2579-0515);

**Галла-Бобик Світлана Василівна (Ужгород)** – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри екології та охорони навколишнього середовища, Державний вищий навчальний заклад «Ужгородський національний університет», [orcid.org/0000-0001-7869-2375](https://orcid.org/0000-0001-7869-2375);

**Гапон Світлана Василівна (Полтава)** – доктор біологічних наук, професор, професор кафедри геоматики, землеустрою та планування територій, Полтавський державний аграрний університет, [orcid.org/0000-0002-4902-6055](https://orcid.org/0000-0002-4902-6055);

**Герасименко Микола Васильович (Київ)** – аспірант, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», [orcid.org/0009-0009-9991-1106](https://orcid.org/0009-0009-9991-1106);

**Герасимчук Людмила Олександрівна (Житомир)** – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», [orcid.org/0000-0002-3166-5588](https://orcid.org/0000-0002-3166-5588);

**Гнезділова Вікторія Ігорівна (Івано-Франківськ)** – кандидат біологічних наук, доцент, в.о. завідувача кафедри біології та екології, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, [orcid.org/0000-0002-4863-6775](https://orcid.org/0000-0002-4863-6775);

**Голембіовська Олена Ігорівна (Київ)** – кандидат фармацевтичних наук, доцент, доцент кафедри трансляційної медичної біоінженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», [orcid.org/0000-0001-5531-5374](https://orcid.org/0000-0001-5531-5374);

**Головатюк Людмила Михайлівна (Кременець)** – кандидат біологічних наук, доцент, Кременецька обласна гуманітарно-педагогічна академія імені Тараса Шевченка, [orcid.org/0000-0002-2099-145X](https://orcid.org/0000-0002-2099-145X);

**Гончарук Віталій Володимирович (Умань)** – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри хімії та екології, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, [orcid.org/0000-0002-3977-3612](https://orcid.org/0000-0002-3977-3612);

**Гребенюк Тетяна Володимирівна (Київ)** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геоінженерії, Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», [orcid.org/0000-0002-9287-2919](https://orcid.org/0000-0002-9287-2919);

**Гура Олександр Олександрович (Миколаїв)** – аспірант кафедри екології та природоохоронних технологій, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, [orcid.org/0009-0006-9515-0125](https://orcid.org/0009-0006-9515-0125);

**Даньків Вікторія Ярославівна (Оброшине)** – кандидат сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник, Інститут сільського господарства Карпатського регіону Національної академії аграрних наук України, [orcid.org/0000-0002-4988-2353](https://orcid.org/0000-0002-4988-2353);

**Демків Анна Миколаївна (Київ)** – PhD, доцент, старший науковий співробітник відділу організації науково-дослідної та патентної діяльності, Інститут наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України, [orcid.org/0000-0002-1604-1793](https://orcid.org/0000-0002-1604-1793);

**Диченко Оксана Юріївна (Полтава)** – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри екології, збалансованого природокористування та захисту довкілля, Полтавський державний аграрний університет, [orcid.org/0000-0003-0113-9998](https://orcid.org/0000-0003-0113-9998);

**Дмитренко Тетяна Володимирівна (Харків)** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної екології міст, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, [orcid.org/0000-0002-0447-644X](https://orcid.org/0000-0002-0447-644X);

**Доценко Олександр Григорович (Київ)** – PhD, старший дослідник, начальник науково-випробувального відділу дослідження пожежно-рятувальної техніки, оснащення та засобів захисту науково-дослідного центру досліджень та випробувань, Інститут наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України, [orcid.org/0000-0001-7437-8733](https://orcid.org/0000-0001-7437-8733);

**Жаврида Дар'я Євгенівна (Київ)** – доктор філософії з екології, голова, Благодійна організація «БФ еколого-рекреаційного та спортивного розвитку», голова екологічного комітету громадської ради при Київській обласній державній адміністрації, доцент кафедри мікробіології, сучасних біотехнологій, екології та імунології, Інститут біомедичних технологій Відкритого міжнародного університету розвитку людини «Україна», [orcid.org/0000-0002-8453-9243](https://orcid.org/0000-0002-8453-9243);

**Золотько Олена Василівна (Дніпро)** – кандидатка технічних наук, доцентка, доцентка кафедри безпеки життєдіяльності, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, [orcid.org/0000-0003-2482-7574](https://orcid.org/0000-0003-2482-7574);

**Іваненко Євген Ігорович (Київ)** – кандидат географічних наук, науковий співробітник відділу ландшафтознавства, Інститут географії Національної академії наук України, [orcid.org/0000-0001-8783-9930](https://orcid.org/0000-0001-8783-9930);

**Іваненко Ігор Борисович (Київ)** – кандидат хімічних наук, заступник директора, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», [orcid.org/0009-0000-6173-4858](https://orcid.org/0009-0000-6173-4858);

**Іванов Євген Анатолійович (Львів)** – доктор географічних наук, професор, завідувач кафедри конструктивної географії і картографії, Львівський національний університет імені Івана Франка, [orcid.org/0000-0001-6847-872X](https://orcid.org/0000-0001-6847-872X);

**Іванюк Руслан Олександрович (Житомир)** – аспірант кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», [orcid.org/0009-0005-5144-5178](https://orcid.org/0009-0005-5144-5178);

**Кавчук Ірина Михайлівна (Івано-Франківськ)** – аспірант кафедри лісового і аграрного менеджменту, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, [orcid.org/0009-0004-8485-3277](https://orcid.org/0009-0004-8485-3277);

**Кватернюк Сергій Михайлович (Вінниця)** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Вінницький національний технічний університет, [orcid.org/0000-0003-1296-8249](https://orcid.org/0000-0003-1296-8249);

**Книш Іван Богданович (Львів)** – асистент кафедри екологічної та інженерної геології і гідрогеології, Львівський національний університет імені Івана Франка, [orcid.org/0000-0001-7962-5414](https://orcid.org/0000-0001-7962-5414);

**Коваленко Юрій Леонідович (Харків)** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри інженерної екології міст, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, [orcid.org/0000-0002-2491-2309](https://orcid.org/0000-0002-2491-2309);

**Ковган Ярослав Олександрович (Київ)** – аспірант, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», [orcid.org/0009-0000-7691-7833](https://orcid.org/0009-0000-7691-7833);

**Коссак Григорій Михайлович (Дрогобич)** – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри біології та хімії, Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка, [orcid.org/0009-0007-7487-4674](https://orcid.org/0009-0007-7487-4674);

**Крайнюков Олексій Миколайович (Харків)** – доктор географічних наук, професор, професор кафедри екології та менеджменту довкілля, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, [orcid.org/0000-0002-5264-3118](https://orcid.org/0000-0002-5264-3118);

**Кратко Ольга Вікторіна (Кременець)** – кандидат історичних наук, доцент, завідувачка кафедри біології, екології та методик їх навчання, Кременецька обласна гуманітарно-педагогічна академія імені Тараса Шевченка, [orcid.org/0000-0002-2708-4684](https://orcid.org/0000-0002-2708-4684);

**Кречківська Галина Володимирівна (Дрогобич)** – кандидат біологічних наук, доцент кафедри біології та хімії, Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка, [orcid.org/0000-0002-8424-7232](https://orcid.org/0000-0002-8424-7232);

**Кривицька Іветта Анатоліївна (Харків)** – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри зоології та екології тварин, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, [orcid.org/0009-0003-9975-3722](https://orcid.org/0009-0003-9975-3722);

**Крілевич Володимир Романович (Львів)** – аспірант кафедри екології та захисту довкілля, Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького, [orcid.org/0009-0006-0063-6350](https://orcid.org/0009-0006-0063-6350);

**Куманська Юлія Олександрівна (Біла Церква)** – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри генетики, селекції і насінництва сільськогосподарських культур, Білоцерківський національний аграрний університет, [orcid.org/0000-0001-5945-5737](https://orcid.org/0000-0001-5945-5737);

**Купчак Руслан Володимирович (Івано-Франківськ)** – аспірант кафедри біології та екології, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, [orcid.org/0009-0000-6448-8277](https://orcid.org/0009-0000-6448-8277);

**Ладика Марина Миколаївна (Київ)** – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри екології агросфери та екологічного контролю, Національний університет біоресурсів і природокористування України, [orcid.org/0000-0002-5164-7117](https://orcid.org/0000-0002-5164-7117);

**Латуша Дмитро Русланович (Вінниця)** – аспірант кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Інститут докторантури та аспірантури Вінницького національного технічного університету, [orcid.org/0009-0005-7808-1300](https://orcid.org/0009-0005-7808-1300);

**Літвак Ольга Анатоліївна (Миколаїв)** – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, [orcid.org/0000-0002-1351-3900](https://orcid.org/0000-0002-1351-3900);

**Магась Наталія Іванівна (Миколаїв)** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, заступник начальника лабораторії моніторингу вод, Регіональний офіс водних ресурсів у Миколаївській області, [orcid.org/0000-0002-2579-1465](https://orcid.org/0000-0002-2579-1465);

**Максименко Костянтин Олександрович (Дніпро)** – студент III курсу механіко-математичного факультету, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, [orcid.org/0009-0001-7260-6816](https://orcid.org/0009-0001-7260-6816);

**Мандебура Святослав Васильович (Умань)** – викладач кафедри хімії та екології, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, [orcid.org/0000-0001-7952-5974](https://orcid.org/0000-0001-7952-5974);

**Мельник-Шамрай Вікторія Вікторівна (Житомир)** – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», [orcid.org/0000-0002-3551-5085](https://orcid.org/0000-0002-3551-5085);

**Михайлова Альона Вікторівна (Київ)** – кандидат технічних наук, старший дослідник, начальник відділу організації науково-дослідної та патентної діяльності, Інститут наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України, [orcid.org/0009-0009-1391-3267](https://orcid.org/0009-0009-1391-3267);

**Мільович Степан Степанович (Ужгород)** – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри екології та охорони навколишнього середовища, Державний вищий навчальний заклад «Ужгородський національний університет», [orcid.org/0000-0002-4878-2887](https://orcid.org/0000-0002-4878-2887);

**Морозова Тетяна Василівна (Київ)** – кандидат біологічних наук, доцент, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», [orcid.org/0000-0003-4836-1035](https://orcid.org/0000-0003-4836-1035);

**Нагорна Світлана Вікторівна (Полтава)** – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри геоматики, землеустрою та планування територій, Полтавський державний аграрний університет, [orcid.org/0000-0001-6286-1656](https://orcid.org/0000-0001-6286-1656);

**Наконечний Ігор Володимирович (Миколаїв)** – доктор біологічних наук, професор, професор кафедри екології та природоохоронних технологій, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, [orcid.org/0000-0002-3797-3725](https://orcid.org/0000-0002-3797-3725);

**Никитюк Юрій Андрійович (Житомир)** – доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри екології, Поліський національний університет, [orcid.org/0000-0001-9142-7699](https://orcid.org/0000-0001-9142-7699);

**Нікішкін Костянтин Петрович (Львів)** – директор, ТОВ «Екоенергоресурси», [orcid.org/0009-0001-0459-8009](https://orcid.org/0009-0001-0459-8009);

**Павленко Анатолій Олегович (Кривий Ріг)** – в.о. молодшого наукового співробітника відділу оптимізації техногенних ландшафтів, Криворізький ботанічний сад Національної академії наук України, [orcid.org/0000-0003-1156-8737](https://orcid.org/0000-0003-1156-8737);

**Павлишак Ярослава Ярославівна (Дрогобич)** – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри біології та хімії, Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка, [orcid.org/0000-0003-3402-6922](https://orcid.org/0000-0003-3402-6922);

**Парахненко Владислав Геннадійович (Умань)** – доктор філософії з наук про Землю, старший викладач кафедри екології та безпеки життєдіяльності, Уманський національний університет, [orcid.org/0000-0002-4312-6194](https://orcid.org/0000-0002-4312-6194);

**Пасічник Вероніка Сергіївна (Дніпро)** – студентка III курсу механіко-математичного факультету, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, [orcid.org/0009-0000-8535-6134](https://orcid.org/0009-0000-8535-6134);

**Пашенко Ганна Вікторівна (Київ)** – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри дизайну середовища, Київська академія декоративно-прикладного мистецтва і дизайн імені Михайла Бойчука, [orcid.org/0000-0003-1455-5245](https://orcid.org/0000-0003-1455-5245);

**Петрук Василь Григорович (Вінниця)** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Вінницький національний технічний університет, [orcid.org/0000-0002-0834-7338](https://orcid.org/0000-0002-0834-7338);

**Пикало Сергій Володимирович (с. Центральне)** – кандидат біологічних наук, старший дослідник, провідний науковий співробітник відділу біотехнології, генетики і фізіології, Миронівський інститут пшениці імені В.М. Ремесла Національної академії аграрних наук України, [orcid.org/0000-0002-3158-3830](https://orcid.org/0000-0002-3158-3830);

**Пірич Аліна Володимирівна (с. Центральне)** – кандидат сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник відділу біотехнології, генетики і фізіології, Миронівський інститут пшениці імені В.М. Ремесла Національної академії аграрних наук України, [orcid.org/0000-0003-2312-9774](https://orcid.org/0000-0003-2312-9774);

**Полив'ячук Андрій Павлович (Вінниця)** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Вінницький національний технічний університет, [orcid.org/0000-0002-9966-1938](https://orcid.org/0000-0002-9966-1938);

**Пономаренко Дмитро Володимирович (Харків)** – начальник відділу техногенно-екологічної безпеки та водних об'єктів, Регіональний офіс водних ресурсів у Харківській області, аспірант Науково-дослідної установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», [orcid.org/0009-0009-9406-1130](https://orcid.org/0009-0009-9406-1130);

**Присяжнюк Віталій В'ячеславович (Київ)** – кандидат технічних наук, старший дослідник, науковий співробітник відділу організації науково-дослідної та патентної діяльності, Інститут наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України, [orcid.org/0000-0002-9780-785X](https://orcid.org/0000-0002-9780-785X);

**Разанов Сергій Федорович (Львів)** – доктор сільськогосподарських наук, професор кафедри екології та захисту довкілля, Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького, [orcid.org/0000-0002-4883-2696](https://orcid.org/0000-0002-4883-2696);

**Різничук Надія Іванівна (Івано-Франківськ)** – кандидат біологічних наук, доцент кафедри біології та екології, науковий куратор дендрологічного парку «Дружба», Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, [orcid.org/0000-0002-4863-6775](https://orcid.org/0000-0002-4863-6775);

**Русакова Тетяна Іванівна (Дніпро)** – докторка технічних наук, професорка, завідувачка кафедри безпека життєдіяльності, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, [orcid.org/0000-0001-5526-3578](https://orcid.org/0000-0001-5526-3578);

**Рушак Володимир Олегович (Івано-Франківськ)** – аспірант кафедри екології, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, [orcid.org/0009-0000-6821-8637](https://orcid.org/0009-0000-6821-8637);

**Савцова Оксана Вікторівна (Харків)** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри хімії та інтегрованих технологій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, [orcid.org/0000-0001-6664-2274](https://orcid.org/0000-0001-6664-2274);

**Семічак Сергій Валерійович (Київ)** – старший науковий співробітник науково-випробувального відділу дослідження пожежно-рятувальної техніки, оснащення та засобів захисту науково-дослідного центру досліджень та випробувань, Інститут наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України, [orcid.org/0000-0002-2413-5386](https://orcid.org/0000-0002-2413-5386);

**Сидоренко Володимир Леонідович (Київ)** – доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник науково-випробувального відділу дослідження пожежно-рятувальної техніки, оснащення та засобів захисту науково-дослідного центру досліджень та випробувань, Інститут наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України, [orcid.org/0000-0002-4584-486X](https://orcid.org/0000-0002-4584-486X);

**Степовий Євген Борисович (Полтава)** – аспірант, Навчально-науковий інститут нафти і газу Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», [orcid.org/0009-0001-4783-3929](https://orcid.org/0009-0001-4783-3929);

**Телюра Наталя Олександрівна (Харків)** – кандидат технічних наук, доцент, начальник науково-дослідної частини, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, [orcid.org/0000-0003-0732-7789](https://orcid.org/0000-0003-0732-7789);

**Тітяпкин Андрій Станіславович (Одеса)** – начальник відділу аналізу морських екосистем та антропогенного навантаження – начальник морського інформаційно-аналітичного центру, Український науковий центр екології моря, аспірант, Інститут морської біології Національної академії наук України, [orcid.org/0000-0002-7463-5442](https://orcid.org/0000-0002-7463-5442);

**У Жофань (Київ)** – аспірант кафедри екології агросфери та екологічного контролю, Національний університет біоресурсів і природокористування України, [orcid.org/0000-0001-8897-4608](https://orcid.org/0000-0001-8897-4608);

**Федченко Єлизавета Петрівна (Київ)** – студентка II курсу магістратури, Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», [orcid.org/0009-0004-1450-053X](https://orcid.org/0009-0004-1450-053X);

**Ченчак Михайло Михайлович (Ужгород)** – аспірант кафедри екології та охорони навколишнього середовища, Державний вищий навчальний заклад «Ужгородський національний університет», [orcid.org/0009-0008-9855-2888](https://orcid.org/0009-0008-9855-2888);

**Чепурний Ігор Валерійович (Івано-Франківськ)** – кандидат геологічних наук, доцент, доцент кафедри геодезії та землеустрою, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, [orcid.org/0000-0003-2109-3827](https://orcid.org/0000-0003-2109-3827);

**Шевченко Валентин Олександрович (Вінниця)** – аспірант кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Інститут докторантури та аспірантури Вінницького національного технічного університету, [orcid.org/0000-0002-1035-9290](https://orcid.org/0000-0002-1035-9290);

**Шмідт Анатолій Євгенович (Житомир)** – аспірант кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», [orcid.org/0009-0002-3993-5164](https://orcid.org/0009-0002-3993-5164);

**Шокало Наталія Сергіївна (Полтава)** – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри селекції, насінництва і генетики, Полтавський державний аграрний університет, [orcid.org/0000-0001-7839-8168](https://orcid.org/0000-0001-7839-8168);

**Юрченко Тетяна Василівна (с. Центральне)** – кандидат сільськогосподарських наук, старший дослідник, завідувачка відділу біотехнології, генетики і фізіології, Миронівський інститут пшениці імені В.М. Ремесла Національної академії аграрних наук України, [orcid.org/0000-0003-0164-4003](https://orcid.org/0000-0003-0164-4003);

**Яковлєв Валерій Володимирович (Харків)** – доктор геологічних наук, доцент, професор кафедри інженерної екології міст, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, головний гідрогеолог, ТОВ «Лабораторія якості води «ПЛАЯ», [orcid.org/0000-0003-2637-6594](https://orcid.org/0000-0003-2637-6594);

**Ящук Людмила Борисівна (Черкаси)** – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Черкаський державний технологічний університет, [orcid.org/0000-0001-8975-851X](https://orcid.org/0000-0001-8975-851X).

# НОТАТКИ

# ЕКОЛОГІЧНІ НАУКИ

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

1(64)

- **Екологія заповідних територій та рекреаційна діяльність**
- **Агроекологія**
- **Екологія атмосферного повітря**
- **Екологія водних ресурсів**
- **Екологія землекористування**
- **Екологія природних ресурсів**
- **Екологія біорізноманіття**
- **Екологія будівництва**
- **Екологія виробництва**
- **Екологія екосистем**
- **Теоретична екологія**
- **Екологічний моніторинг**
- **Екологія та повоєнний розвиток України**
- **Екологія урбанізованих ландшафтів**
- **Збереження біологічного та ландшафтного різноманіття**
- **Загальні проблеми екологічної безпеки**

Адреса редакції:

Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»  
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корпус 2, Київ, 03035;  
тел. +380 99 428 67 00;  
[www.ecoj.dea.kiev.ua](http://www.ecoj.dea.kiev.ua)  
e-mail: [info@ecoj.dea.kiev.ua](mailto:info@ecoj.dea.kiev.ua)

Видавничий дім «Гельветика»

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7623 від 22.06.2022 р.  
Україна, 65101, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1  
Тел. +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08  
E-mail: [mailbox@helvetica.ua](mailto:mailbox@helvetica.ua)

Дата розміщення онлайн – 13.04.2026 р.

Дата друку – 20.04.2026 р. Формат 64x84/8.

Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman. Цифровий друк.

Ум. друк. арк. 26,97. Тираж 100. Замовлення № 0426/291.

Ціна договірна. Віддруковано з готового оригінал-макета